

安防新技术及系统系列精品丛书

安防&光电信息

——安防监控技术基础

雷玉堂 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是安防新技术及系统系列精品丛书之四,从安防界存在的 150 条安防技术知识概念混淆不清与错误的问题入手,以光电信息技术方面的基础知识为切入点,全面、系统地阐述了光电信息技术各部分的理论基础、工作原理、实用技术与方法,及其在安防监控中的应用实例。具体内容共 9 章:安防&光电信息技术基础及安防技术发展方向,光电发光器件及其在安防中的应用,光辐射信息探测器件及其在安防中的应用,光图像信息探测器件及其在安防中的应用,光纤传感技术及其在安防中的应用,光电信息传输技术及其在安防中的应用,光电信息处理技术及其在安防中的应用,光电信息存储技术及其在安防中的应用,光电信息显示技术及其在安防中的应用等。

本书理论与实践并重,内容系统全面、层次分明,可供从事安防技术(或安防工程)、安防或安全管理等专业的科研人员、工程技术人员、管理人员参考;本书也可作为高校与职校现代安防科学与技术专业的基础教材,作为教材时,前 5 章可作为安防技术及其相关专业的必修课程,为避免重复,后 4 章需根据各安防相关专业的需要后续课程的有无,而进行有选择性的学习。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

安防&光电信息:安防监控技术基础 / 雷玉堂编著. —北京:电子工业出版社, 2016.3

(安防新技术及系统系列精品丛书)

ISBN 978-7-121-28163-1

I. ①安… II. ①雷… III. ①光电子技术—信息技术—应用—安全监控系统 IV. ①TN2②X924.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 029039 号

责任编辑:田宏峰

印 刷:

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:24.25 字数:627 千字

版 次:2016 年 3 月第 1 版

印 次:2016 年 3 月第 1 次印刷

印 数:2 500 册 定价:79.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

光（光学）是人们获取信息的最基本的和最有效的手段之一，以光子或光波作为信息载体的光电信息技术则表现出巨大的发展潜力和明显的优越性。尤其光电信息技术在高技术战争中扮演着十分重要的角色，如在预警、监视、侦察、观察、瞄准、通信、精确打击、作战效果评估、电子对抗等方面都发挥了极其重要的作用，使作战方式、部队编制和后勤供应都发生了重大变化。因此，光电信息技术不仅全面继承兼容电子技术，而且具有微电子无法比拟的优越性能与更广阔的应用范围，从而成为人类进入信息时代的具有巨大冲击力的高新技术。

随着光电信息技术、微电子、微计算机及数字视频技术的发展，安防技术已由传统的模拟式向着高度集成的小型化、数字化、网络化，高清化、智能化的方向发展。目前，安防技术已从应用各学科技术的经典模式向以图像分析处理、识别与跟踪为核心的安防技术本身特点所需要的现代智能化模式转变。安全防范技术学科已由光电信息等其他学科的应用技术，发展成为一专门的独立的学科技术。而这个学科最主要的特点是处于光电信息技术基础上与其他学科的边缘和多学科交叉。

为什么说安防技术学科是在光电信息技术的基础上呢？其原因之一是，一个安全防范系统的前端的图像传感器、防盗、防火探测器主要是 CCD 和 CMOS 光电成像器件，以及各种光辐射探测器件（即光敏与热敏探测器件，现又进一步发展到各种光纤传感器），其终端的录像记录与显示是光电存储器和各种光电发光器件，即电光转换器件构成的显示设备，以及可见与不可见光的照明光源，还有传输图像信息用的光纤光缆、无线红外光传输，夜视，以及光电图像的视频处理、识别与跟踪系统等，而这些都是光电信息技术中的核心内容。其原因之二是，你翻开光电信息工程专业的光电信息技术课教材（如电子工业出版社在 2011 年 1 月出版的“光电信息技术”教材），其中每一章都与安防监控技术有关，而这些内容，又都是安防监控设备与系统的核心。显然，它们应该是学好安防监控技术的基础，学了它不仅使安防技术专业课易懂，且使课时数大大减少。而电子技术、计算机技术等学科专业中，找不到任何一门课程能达到这样的效果。因此，也可以说，安防技术实质上主要是光电信息技术在安全技术防范系统中的一门应用科学技术。当然，安防系统的控制部分，要用到计算机的软/硬件技术，电路部分要用到电子技术，设备的装配、定位与机壳的设计制备又牵涉到机械技术等。因此可以说，安防技术是集光电、电子、计算机、通信、机械等为一体的多学科的边缘和多学科交叉的综合性应用的高新技术。所以，广义地说，安防监控技术是现代技术综合应用的科学技术；狭义地说，安防监控技术就是光电信息技术的应用科学技术。

目前，传统的学科界限和专业界限将越来越淡化，各种高新技术的交叉渗透和融合，将是一门新技术（如安防监控技术）未来发展的总趋势。因此，安防监控系统的设计者，要密切注意各领域科学技术的发展，要不断采用先进而成熟的技术，不断地充实智能化功能，以完善系统的设计。综上所述，安防监控技术的学科性质全面而确切地说应该是，在光电信息技术基础上的一门多学科交叉的前沿学科的综合性的应用科学技术。

但是一直到现在，安防界的权威人士对安防监控技术的学科性质还认识不清，因而在创办安防技术或安防工程专业，制订该专业的教学计划时，都没有开设光电信息技术这一安防技术的基础课程，所以在安防领域的专家与技术人员撰写的文章与安防书籍中，出现了不应该有的 150 条安防技术基本知识概念混淆不清与错误的问题。如果学习了光电信息技术这一基础课程，也绝对不会出现说，可见光的波长是 $0\sim 720\text{ ns}$ 之间；红外波长是大于 700 MM 、 0.7 uM ；CCD

是光耦器件；被动红外探测器用来感光的是 CCD；镜头是传感的、轮巡的、监控的，分辨力的单位是“线（TVL）”……等可笑错误。

在 150 条错误中，其中最典型的是对光电成像器件与系统的分辨率与分辨力的混淆问题，如公安部上海 3 所某技术人员在 2010 年 12 月 A&S（安防工程商）杂志上发表了“安防摄像机分辨力指标分析和测试方法探讨”的错误文章，充分暴露了对分辨率与分辨力的混淆与错误问题。虽然，我在该杂志同期上发表了“论成像系统易混淆的分辨率与分辨力”一文，但由于该错误文章是引用了国标 GB12338—90、GB20815—2006 中对分辨力定义的错误，据说该文还有某位“专家”的认可，因而该杂志又在其季刊上转载了该错误文章（后被道客巴巴、豆丁网等错误转载）。2012 年 1 月在电子工业出版社出版的《安防视频监控实用技术》书的 1.3 节中，我列出了 105 条安防技术基本知识概念混淆不清与错误的问题来予以纠正（后发现有的专家在他发表的文章中就改正了原来的错误），但还未引起安防界有关部门及权威人士的重视，现又增加了 45 条共 150 条。因此，本书在 1.4 节中再次论述一下安防监控技术的学科性质及由此产生的 150 条安防技术基本知识概念混淆不清与错误的问题，期望能引起安防界有关部门及权威人士的重视。

目前从事安防技术的工作人员，大多是一些学电子技术与计算机技术等专业的，而几乎没有光电信息技术类专业的毕业生。这一方面是电子与计算机专业是老专业，毕业的学生多；而光电信息是边缘学科的新专业，毕业的学生少；另一方面，各安防公司的老总也未看清安防技术最主要是光电信息技术的应用技术，因而造成安防技术的工作几乎没有光电信息技术类专业的人员，所以，这些人员缺乏光电信息技术的基本理论知识，因而在写文章、甚至未经严格审查的产品说明与出版的书籍等中，都出现这样或那样的概念混淆与错误。尤其在安防杂志与网站的技术文章中，由于各安防公司有相当地位甚至还可能被安上“专家”的技术人员写的文章，其他人员再转抄，加上从事传媒编辑的人员大多是学文科的，而某些杂志又不像一些专业核心期刊那样，把技术文章送真正的专家审核把关，编辑们又看不懂有否技术问题，也只能在文字与格式上做一点修改，就是有错误也照登，所以错误就一犯再犯，使传媒杂志与网站的技术质量不高（一般，凡是期刊的技术稿件，都应请技术专家审核把关）。

目前，由于安防技术还不是一个独立的科技门类，也没有成立安防技术学会，大专院校或科研机构也没有专门的安防技术专业，现在只有中国人民公安大学、厦门安防科技职业学院、浙江安防职业技术学院与几个警官与政法职业学院开办了安防技术或安防工程专业，但均未开设光电信息技术基础课，因而安防行业的研发人才多由电子、计算机或通信等行业转行而来，尤其缺乏光电信息技术，因此真正的高层次的研发人才十分匮乏。所以，急需要高等院校对口专业培养的一批真正是有光电信息技术基础的安全防范技术学科的专业人才。

作者一直从事光电信息技术的教学与科研，已编著本科与研究生光电类教材与专著有《光电技术》（第 1、2 版）、《光电技术实验》、《光纤及其传感技术》、《图像测量技术》、《光电仪器及系统设计》、《光电检测技术》（第 1、2 版）、《光电检测技术习题与实验》、《光电信息实用技术》、《光电信息技术》等 9 项 11 本。现根据有的高校的需要，还计划写本科与研究生光电类教材《视频图像测量技术》、《光电器件及系统》，给职校光电专业大中专班写《光电子器件制作技术》、《光电子器件检测技术》等。

作者自 1994 年被武汉一个安防公司聘为技术顾问开始，参与安防工作到现在已有 21 年，并深知安防界存在的问题。退休后带领硕博研究生团队给广州、中山、深圳有关公司研发安防与人民币防伪产品，并被一些安防公司聘为总工、技术总监与技术顾问，被一些安防传媒聘为

编辑顾问与技术专家,被多所高校光电院系与重点实验室,以及一些安防与商学院聘为兼职教授、客座教授、荣誉教授、合作教授与博士生导师。由于发表文章用理论公式驳斥了安防领域中那些不懂光电所出现的错误问题,而被一些网站誉为“中国安防行业技术的领军人物”等。在安防技术方面已出版的著作有《安全&光电》、《安防视频监控实用技术》、安防新技术及系统系列精品丛书之一《安防&智能化——视频监控系统智能化实现方案》、丛书之二《安防&物联网——物联网智能安防系统实现方案》、丛书之三《安防&云计算——物联网智能云安防系统实现方案》等5本。本书是丛书之四,还计划写丛书《安防&大数据》、《安防&智慧化》等。

由于我国急需安防技术专业人才与这一专业应学的专业理论及技能,现计划帮助一些院校创办真正的有光电信息技术基础的安防技术或安防工程专业,除光电信息技术或本书可作为现代安防专业基础教材外,后面准备给高校与职校现代安防技术专业撰写光电信息学科-安防科学技术与工程专业实用技术系列精品丛书《现代安防视频监控实用教程》、《安防视频监控设备的使用与维修》、《安防系统工程的设计施工安装调试与维护》、《安防入侵探测报警实用技术》、《安防目标识别与出入口控制实用技术》等。有想创办有光电信息技术基础的现代安防专业者,可来邮(lei3833@126.com)交流联系。

本书是安防新技术及系统系列精品丛书之四,也可作为高校与职校光电信息学科-现代安防科学技术与工程专业基础教材。本书理论与实践并重,内容系统全面、层次分明,可作为公安院校、安防院校及一些理工院校与一些职业技术学院的安防技术(或安防工程)、安防或安全管理、视频监控、智能建筑、智能交通、信息工程、光电工程、质量工程、网络工程、应用电视等专业的教材与教学参考书,也可供从事上述专业的科研人员、工程技术人员、管理人员参考。

本书是雷教授同其学生们及有关公司负责人共同完成的,其中,武汉乐通光电公司总经理罗辉编写了4.2.4节;武汉昱升光器件公司总经理明志文编写了2.4.2节;广州天网安防科技公司总经理邱亮南编写了2.2.3节;公安部第3研究所郑国刚副研究员编写了7.2.2节;海军工程大学白雪飞博士编写了4.1.2节;美国HP新加坡公司高工、武汉乐通光电公司高新技术研究所特约研究员雷军与黄晓曦博士编写了7.3.1~7.3.3节;乐通光电深圳高新技术研究所的杨中东博士编写了4.3.4节,周宇翔工程师编写了7.2.2节,其余为雷教授编写并统稿完成。

本书在编写过程中参考了国内外的相关书籍及技术资料,并根据本书体系的需要,在有的章节内采用了其中的部分内容,这些都将在书末以参考文献形式给出,本人在此向同行作者们表示最衷心的感谢!但需说明的是,还有的部分内容来源于互联网,由于未能准确查明原创作者及出处,因而未能在参考文献中列出,敬请谅解。欢迎与本人联系,以便更正。

由于光电信息与安防监控技术发展迅速,涉及的学科范围广,加上作者的知识局限,难免出现错误与不足,敬请专家学者、技术工作者、教师与学生们提出批评指正。

编 著 者
2015年12月

目 录

第 1 章 安防&光电信息技术基础及安防技术发展方向	(1)
1.1 光的基本性质及其度量	(1)
1.1.1 光的基本性质	(1)
1.1.2 光辐射的度量	(3)
1.2 半导体物理基础	(6)
1.2.1 半导体的能带	(7)
1.2.2 热平衡与非平衡载流子及其运动	(10)
1.2.3 半导体对光的吸收	(15)
1.2.4 半导体的 PN 结	(17)
1.2.5 半导体与金属的接触	(20)
1.3 光辐射电效应	(22)
1.3.1 光电效应	(23)
1.3.2 热电效应	(29)
1.4 安防技术学科性质及由此产生的基本知识概念混淆与错误	(32)
1.4.1 安防监控技术的学科性质	(32)
1.4.2 安防监控技术基本知识概念混淆不清与错误的 150 条问题	(36)
1.4.3 识别安防技术知识概念混淆与错误需掌握的基本知识点	(44)
1.5 现代安防监控技术的发展方向	(47)
1.5.1 安防监控技术的演进与发展	(47)
1.5.2 安防监控技术必须向智能化方向发展	(48)
1.5.3 现代安防监控技术的发展方向是物联网智能云安防技术	(51)
第 2 章 光电发光器件及其在安防中的应用	(53)
2.1 常用的普通光源及其在安防中的应用	(53)
2.1.1 光源的基本特性参数	(53)
2.1.2 常用的普通光源	(55)
2.1.3 常用的普通光源在安防中的应用	(57)
2.2 发光二极管 LED 及其在安防中的应用	(58)
2.2.1 发光二极管(LED)的结构及其发光原理	(58)
2.2.2 发光二极管(LED)的主要特性参数	(60)
2.2.3 发光二极管(LED)在安防中的应用	(62)
2.3 环保白光 LED 与平面分布式 OLED 光源及其在安防中的应用	(65)
2.3.1 固体环保白光 LED 光源及其在安防中的应用	(65)
2.3.2 高效节能平面分布式 OLED 固态光源及其在安防中应用	(67)
2.4 激光器及其在安防中的应用	(69)
2.4.1 激光器概述	(69)
2.4.2 半导体激光器	(73)

2.4.3	光纤激光器	(80)
2.4.4	光子晶体与光子晶体光纤激光器	(82)
2.4.5	激光器在安防中的应用	(85)
第3章	光辐射信息探测器件及其在安防中的应用	(93)
3.1	光辐射信息探测器件概述	(93)
3.1.1	光辐射信息探测器件的类型和特点	(93)
3.1.2	光辐射信息探测器件的基本特性参数	(94)
3.2	半导体光电导型探测器件及其在安防中的应用	(99)
3.2.1	光电导型探测器件的结构及原理	(99)
3.2.2	光敏电阻的特性参数	(101)
3.2.3	光电导型探测器件的使用要点及在安防中的应用	(103)
3.3	半导体光伏型探测器件及其在安防中的应用	(111)
3.3.1	光电池	(112)
3.3.2	光敏二极管	(115)
3.3.3	光敏三极管	(123)
3.3.4	光伏型探测器件的使用要点及在安防中的应用	(126)
3.4	热电探测器件及其在安防中的应用	(132)
3.4.1	热电偶与热电堆	(132)
3.4.2	热敏电阻	(136)
3.4.3	热释电探测器件	(141)
3.4.4	热电探测器件在安防中的应用	(146)
第4章	光图像信息探测器件及其在安防中的应用	(150)
4.1	光图像信息探测器件的类型与电视制式	(150)
4.1.1	光电成像器件的类型	(150)
4.1.2	电视扫描方式及制式	(151)
4.2	电荷耦合器件 CCD 及其在安防中的应用	(153)
4.2.1	CCD 的结构及原理	(153)
4.2.2	CCD 的类型	(158)
4.2.3	CCD 的特性参数	(162)
4.2.4	CCD 在安防中的应用	(167)
4.3	CMOS 成像器件及其在安防中的应用	(168)
4.3.1	CMOS 成像器件的结构及原理	(169)
4.3.2	CMOS 成像器件的特性参数	(172)
4.3.3	CMOS 成像器件与 CCD 的比较	(176)
4.3.4	CMOS 成像器件在安防中的应用	(176)
4.4	直视型光电成像器件及其在安防中的应用	(178)
4.4.1	像管的结构与工作原理	(179)
4.4.2	主要性能参数	(179)
4.4.3	像增强管的级联	(180)
4.4.4	直视型光电成像器件在安防中的应用	(183)

4.5	特种光电成像器件及其在安防中的应用	(183)
4.5.1	红外光成像器件	(183)
4.5.2	紫外光成像器件	(187)
4.5.3	X 射线光成像器件	(188)
4.5.4	特种光电成像器件在安防中的应用	(191)
第 5 章	光纤传感技术及其在安防中的应用	(195)
5.1	光纤传感技术概述	(195)
5.1.1	光纤的结构与类型及其传光原理	(195)
5.1.2	光纤传感器的结构与类型	(197)
5.1.3	光纤传感技术中的调制技术	(199)
5.2	常用的光纤传感器技术	(200)
5.2.1	常用的光纤传感器技术	(200)
5.2.2	常用的光纤传感器技术的典型应用	(201)
5.3	光纤光栅型传感器技术	(206)
5.3.1	光纤光栅型传感器的类型	(206)
5.3.2	光纤布拉格光栅传感器的原理及优点	(208)
5.3.3	光纤光栅型传感器技术的典型应用	(212)
5.4	多路复用和分布式光纤传感器及其在安防中的应用	(214)
5.4.1	多路复用式光纤传感器技术	(214)
5.4.2	分布式光纤传感器技术	(217)
5.5	光纤传感器技术在安防中的应用	(219)
5.5.1	常用光纤传感器技术在安防中的应用	(220)
5.5.2	光纤光栅型传感器技术在安防中的应用	(220)
5.5.3	多路复用和分布式光纤传感器技术在安防中的应用	(228)
5.5.4	光纤传感器在城市物联网智能安防中的应用	(229)
第 6 章	光电信息传输技术及其在安防中的应用	(234)
6.1	光纤传输技术	(234)
6.1.1	光缆的结构及光纤的连接与耦合	(234)
6.1.2	光纤传输系统的组成与特点	(239)
6.2	无线光波传输技术	(241)
6.2.1	无线光波传输系统的组成原理及特点	(242)
6.2.2	无线光波传输技术的难点及其解决法	(244)
6.3	太赫兹波传输技术	(245)
6.3.1	太赫兹波的产生	(245)
6.3.2	太赫兹波的特点	(246)
6.4	光信息调制传输技术	(247)
6.4.1	光信息调制技术概述	(247)
6.4.2	调制信号的解调技术	(252)
6.5	光电信息传输技术在安防中的应用	(253)
6.5.1	光纤传输技术在安防中的应用	(253)

6.5.2	无线光波传输技术在安防中的应用	(255)
6.5.3	太赫兹波传输技术在安防中的应用	(258)
6.5.4	光信息调制传输技术在安防中的应用	(260)
第7章	光电信息处理技术及其在安防中的应用	(262)
7.1	光电信息处理技术概述	(262)
7.1.1	光电信息处理的特征方法和目标	(263)
7.1.2	图像数字化及其分析处理的方法和内容	(264)
7.1.3	安防监控图像处理的基本方法——像素处理	(267)
7.2	光电图像处理-视频图像处理	(271)
7.2.1	光电图像处理的优势	(271)
7.2.2	视频标准	(272)
7.2.3	视频图像的特点及其处理的研究内容	(275)
7.3	视频内容检索技术	(276)
7.3.1	视频内容检索技术的基本概念	(277)
7.3.2	视频内容检索系统的结构	(280)
7.3.3	视频内容检索的关键技术	(283)
7.4	安防中常用的视频运动目标的检测与识别方法	(290)
7.4.1	背景差法	(290)
7.4.2	帧间差法	(291)
7.4.3	光流法	(292)
7.5	安防视频监控中的行为理解	(293)
7.5.1	视频监控中行为理解概述	(293)
7.5.2	常用行为理解的方法	(294)
7.5.3	行为理解存在的问题及发展趋势	(295)
第8章	光电信息存储技术及其在安防中的应用	(297)
8.1	光盘存储技术	(297)
8.1.1	光盘存储的原理	(298)
8.1.2	光盘存储的类型	(299)
8.1.3	光盘存储器	(306)
8.2	大容量光带存储技术	(309)
8.2.1	大容量光带存储系统的结构原理及类型	(309)
8.2.2	大容量光带存储的方式及与磁光盘的比较	(310)
8.3	全息存储技术	(311)
8.3.1	全息存储的原理	(311)
8.3.2	全息存储的特点	(312)
8.4	超高密度光电存储技术	(312)
8.4.1	双光子双稳态三维存储技术	(313)
8.4.2	电子捕获存储技术	(315)
8.4.3	持续光谱烧孔存储技术	(315)
8.4.4	近场光学存储技术	(317)

8.4.5	超高密度光电存储技术的发展趋势	(317)
8.5	光电信息存储技术在安防中的应用	(318)
8.5.1	光盘存储技术在安防中的应用	(318)
8.5.2	大容量光带存储技术在安防中的应用	(319)
8.5.3	全息等新兴存储技术在安防中的应用	(319)
第9章	光电信息显示技术及其在安防中的应用	(321)
9.1	平板显示技术	(322)
9.1.1	液晶 (LCD) 显示技术	(322)
9.1.2	等离子体 (PDP) 显示技术	(327)
9.1.3	发光二极管 (LED) 显示技术	(330)
9.1.4	有机发光二极管 (OLED) 显示技术	(333)
9.1.5	量子点发光二极管 (QLED) 显示技术	(338)
9.2	投影显示技术	(344)
9.2.1	硅基液晶投影显示技术	(345)
9.2.2	使用数字微镜器件的 DLP 投影显示技术	(347)
9.2.3	光阀投影显示技术	(350)
9.2.4	激光投影显示技术	(353)
9.3	3D 立体显示技术	(356)
9.3.1	眼镜 3D 立体显示技术	(356)
9.3.2	裸眼 3D 立体显示技术	(358)
9.3.3	真 3D 立体显示技术	(359)
9.4	光电信息显示技术的发展趋势及其在安防中的应用	(368)
9.4.1	平板显示技术的发展趋势	(368)
9.4.2	投影显示与大屏显示技术的发展趋势	(370)
9.4.3	3D 立体显示技术的发展趋势	(372)
9.4.4	光电信息显示技术在安防中的应用	(375)
参考文献	(376)

安防&光电信息技术基础及 安防技术发展方向

由本书参考文献[5]《安防视频监控实用技术》1.3节可知，安防监控技术实际上主要是光电信息技术的一门应用学科技术。因此，光电信息技术是安防监控技术的基础，安防监控技术及其相关专业必须开设这一必修的基础课，本书就论述这一原因，并作为这一必修的基础课推出。

本章先论述这一课程的基础，并介绍由于过去安防监控技术及其相关专业未开设这一基础课程，而出现的150条概念混淆与错误的问题。后面各章将介绍光电信息技术各部分在安防监控技术中的应用及其原理、特征参数与特点，以充分证明光电信息技术对安防监控技术的重要性，从而说明只有学好了这一课程，才能正确理解安防监控系统的各部分，并在应用中扬长避短，融合集成创新。本章1.1节到1.3节先介绍安防&光电信息技术的基础知识，1.4节和1.5节论述安防监控技术的学科性质及其发展方向。

1.1 光的基本性质及其度量

光，不仅是支持生命的重要能量，也是生活中的重要信息源。显然，如果没有光，就不可能有我们现在的文明。正是光，为我们提供了很有价值的信息资源。由于安防界要和光打交道（因为安防监控的场景离不开光），因而我们首先必须了解光的基本性质及其度量。

1.1.1 光的基本性质

很久以前，人们就对光学现象进行了研究，并认识到光有直线传播的特点。在17世纪，牛顿根据光直线传播的现象，提出光是由光源飞出的微粒流的假说，认为这些微粒在均匀媒质中沿着直线方向等速度飞行，并以微粒流的观点对反射和折射定律做了解释。随着生产和科学技术的发展，又发现了许多用光的直线传播概念不能解释的较为复杂的光现象，如光的干涉、衍射和偏振等。于是惠更斯、杨氏和费涅耳等提出了光的波动学说，认为光是发光材料中分子振动的结果，这些振动通过一种假想的弹性媒质，以水波一样的方式传播出去。光的波动理论能够解释光的干涉和衍射等现象。到1860年，麦克斯韦电磁理论建立后，才认识到光也是一种电磁现象。原来光和无线电波一样，也是一种电磁波，只不过光的波长比无线电波短得多而已。

电磁波包括的范围很广，如现在已经发现的宇宙射线，其波长小于几个皮米($1\text{ pm}=10^{-12}\text{ m}$)，



而广播用的无线电波的波长则达上千米，它们都属于电磁波的范畴。光波仅仅是电磁波中的一小部分，它包括的波长区间约从几个纳米（ $1\text{ nm}=10^{-9}\text{ m}$ ）到 1 mm 左右。这些光并不是人眼都能看得见的，其中只有波长从 380 nm 到 780 nm 范围内的电磁波，才能引起人眼感光细胞的直接感觉。这一段波谱我们称为可见光区（即 $380\sim 780\text{ nm}$ ，必须牢记，这样才不会错误说出大于 700 nm 的是红外光）。为了清楚起见，分别将紫外、可见和红外光部分放大，如图 1-1 所示。在可见光中，波长最短的是紫光，稍长的是蓝光，以后的顺序是青光、绿光、黄光、橙光和红光，红光的波长最长。而在不可见光中，波长比紫光短的光称为紫外线，比红光长的叫红外线。表 1-1 列出了光的各个波长区域。波长小于 200 nm 的光成为真空紫外，因为这部分光在空气中很快被吸收，所以只能在真空中传播。

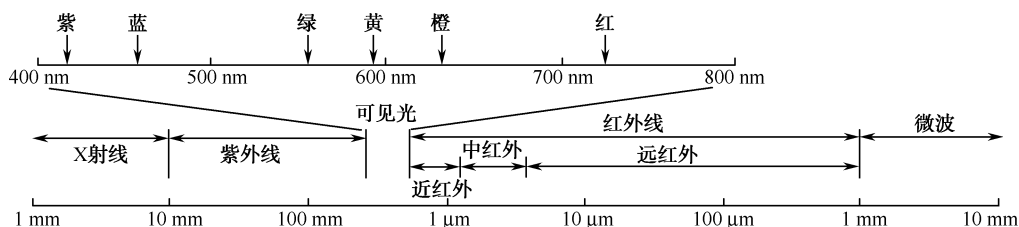


图 1-1 紫外线、可见光和红外线波长

现在常用的光波波长的单位是微米（ μm ）、纳米（ nm ），其关系为 $1\mu\text{m}=10^3\text{ nm}$ 。

应当指出，图 1-1 和表 1-1 只表示各波长区间的大致范围和相互位置，并没有也不可能给出区间的严格界限。实际上，各个区域之间都是逐步过渡而不是截然分开的。

表 1-1 光的各个波长区域

波长区域/nm	区域名称	
10~200	真空紫外区，远紫外区	紫 外 区
200~300	日盲区、中紫外区	
300~380	大气紫外窗口，近紫外区	
380~420	紫光	可 见 光 区
420~450	蓝光	
450~490	青光	
490~560	绿光	
560~590	黄光	
590~620	橙光	
620~780	红光	
780~1 500	近红外区	红 外 区
1 500~10 000	中红外区	
10 000~1 000 000	远红外区	

由于光波也是一种电磁波，因此可以用麦克斯韦方程来描写。由麦克斯韦方程可知，迅速变化着的电磁场必定要向四周传播。电磁波在媒质中传播速度 v 由下式决定。

$$v=\lambda\nu/n \quad (1-1)$$

式中, 速度 v 的单位是 m/s ; λ 为波长, 单位是 m ; ν 为频率, 单位是 Hz ; n 为媒质的折射率。在真空中, $n=1$, 光传播速度 $c=299\,792\,458\,\text{m/s}$, 一般近似记为 $3\times 10^8\,\text{m/s}$ 。除非特别指明, 今后凡提到光的波长、速度, 通常均指真空中的波长、速度。

利用麦克斯韦理论能很好地说明光在传播过程中的反射、折射、干涉、衍射、偏振, 以及光在各向异性介质中的传播等现象。但在研究过程中, 人们发现在光与物质的互相作用方面, 如物质对光的吸收、色散和散射等, 用电磁理论仍不能给出令人满意的解释。1900 年普朗克在研究黑体辐射的能量按波长分布这一问题时发现, 谐振子辐射是不连续的, 提出了辐射的量子论。1905 年, 爱因斯坦在解释光电发射现象时也提出了光量子的概念, 从而逐渐地形成了新的微粒理论——量子论。量子论认为, 光是由许多光量子组成的, 这些光量子具有的能量为 $h\nu$, 其中 $h=(6.6260755\pm 0.0000040)\times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{S}$, 称为普朗克常数。以后的光电效应、X 光散射等实验证实了光量子理论, 并肯定了光具有粒子性。然而, 光的干涉、衍射等现象又必须肯定光具有波动性。事实使人们认识到光具有波粒二重性, 后来发展的量子电动力学也较好地反映了光的这种二重性, 从而使人们对光的本性有了进一步认识。当然这种认识仍然是近似的, 但它更接近客观实际了。

1.1.2 光辐射的度量

辐射是一种能的形式, 它有电磁本质, 又具有量子性质。凡高于绝对零度的物体都会进行热辐射, 温度低的物体发射红外光, 温度升高到 $500\,^{\circ}\text{C}$ 时开始发射暗红色可见光, 温度升高到 $1\,500\,^{\circ}\text{C}$ 时开始发白光。这种靠加热物体并保持一定温度而使内能不变的持续辐射, 称为物体热辐射或温度辐射。因此, 凡能发射连续光谱而辐射是温度函数的物体, 就称为热辐射体, 如一切动植物体、太阳及钨丝白炽灯等。

若物体不是靠加热保温维持辐射, 而是靠外部能量激发的辐射, 则称为发光。显然, 它不是温度的函数, 其发光光谱是非连续光谱。这种靠外部能量激发的发光方式有电致发光、光致发光、化学发光等。一般, 发光的物体也就是光源。由于发光是一种非平衡辐射过程, 其发光光谱主要是线光谱或带光谱。

1. 辐射度量

由于光辐射伴随着辐射能的转移, 这种辐射能及其引起的特性, 需以能量或有效的物理量来测量。因此, 为了研究光辐射现象的规律, 测定出供给光源的能量 (如电能) 转换成光能效率的高低, 通常以表 1-2 中所列出的一些基本参量来描述光源的辐射特性。

表 1-2 辐射度量与单位

度量的名称	符 号	定 义 式	单 位	单位符号
辐射能	Q_e	—	焦耳	J
辐射能密度	w_e	dQ_e/dV	焦耳/米 ³	J/m^3
辐射通量	Φ_e, P	dQ_e/dt	瓦	W
辐射出射度	M_e	$d\Phi_e/dA$	瓦/米 ²	W/m^2
辐射强度	I_e	$d\Phi_e/d\omega$, ω 为点光源辐射通量所张开的立体角	瓦/球面度	W/sr
辐射亮度	L_e	$(dI_e/dA) \cos\theta$, θ 为观察方向与光源表面法线的夹角	瓦/米 ² ·球面度	$\text{W/m}^2 \cdot \text{sr}$
辐照度	E_e	$d\Phi_e/dA$	瓦/米 ²	W/m^2

表 1-2 中已详细列出了各参量的定义式与单位, 这里仅对定义式与单位之外的部分做一简要说明。辐射亮度 L_e 的数值与辐射源的性质有关, 并随给定方向而变。若 L_e 不随方向而变, 则 I_e 正比于 $\cos\theta$, 即

$$I_e = I_0 \cos\theta \quad (1-2)$$

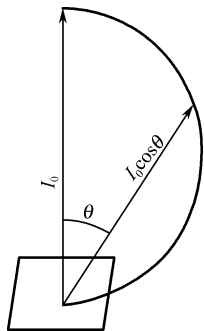


图 1-2 余弦辐射体

此式可用图 1-2 表示。满足式 (1-2) 的特殊光源称为余弦辐射体, 余弦辐射体也称为均匀漫反射体或朗伯体。除了黑体、灰体外, 实验表明, 抛毛乳白玻璃的透视光或反射光, 抛毛乳白板的反射光, 以及氧化镁、硫酸钡等表面的反射光很接近于理想的余弦辐射体, 白雪对阳光的反射也符合余弦辐射体的规律。对余弦辐射体, 即服从朗伯定律的辐射体, 可推算出

$$M_e = \pi L_e \quad (1-3)$$

即余弦辐射体的辐射出射度在数值上为其辐射亮度的 π 倍。对于理想的散射面, 满足条件 $M_e = E_e$, 于是由式 (1-3) 可得

$$E_e = \pi L_e \quad (1-4)$$

2. 光谱辐射度量 (辐射量的光谱密度)

为了表征辐射, 不仅要知道辐射的总通量和强度, 还应知道其光谱组分。因为光源发出的光, 往往由许多波长的光组成。为了研究各种波长的光所分别辐射的能量, 还需要引入光谱辐射度量, 即单位波长间隔内的辐射度量, 其度量和单位如表 1-3 所示。

表 1-3 光谱辐射度量

度量的名称	符 号	定 义 式	单 位	单 位 符 号
光谱辐射通量	Φ_λ	$d\Phi_e/d\lambda$	瓦/微米	$W/\mu m$
光谱辐射通量	Φ_ν	$d\Phi_e/d\nu$	瓦/赫	W/Hz
光谱辐射出射度	M_λ	$dM_e/d\lambda$	瓦/米 ² ·微米	$W/m^2 \cdot \mu m$
光谱辐照度	E_λ	$dE_e/d\lambda$	瓦/米 ² ·微米	$W/m^2 \cdot \mu m$
光谱辐射强度	I_λ	$dI_e/d\lambda$	瓦/球面度·微米	$W/sr \cdot \mu m$
光谱辐射亮度	L_λ	$dL_e/d\lambda$	瓦/米 ² ·球面度·微米	$W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$

光源发出的光在每单位波长间隔内的辐射通量称为光谱辐射通量 (曾称为辐射通量的光谱密度或单色辐射通量) Φ_λ 。由于光源发出的各种波长的 Φ_λ 一般是不同的, 因此若在 λ 到 $\lambda+d\lambda$ 间隔内的辐射通量是 $d\Phi_e$, 则在波长 λ 处的光谱辐射通量为

$$\Phi_\lambda(\lambda) = d\Phi_e(\lambda)/d\lambda \quad (1-5)$$

若按整个光谱积分该函数, 则可求得总的辐射通量值为

$$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (1-6)$$

其他光谱辐射度量也有类似的关系。

3. 光度量

照明光源的特性只用前面所叙述的一些能量参数来描述是不够的, 因为能量参数并没有考

考虑到人眼的作用。由于照明的效果最终是以人眼来评定的,因此照明光源的光学特性必须用基于人眼视觉的光学参量,即光度量来描述。

光度量是人眼对相应辐射度量的视觉强度值。人的视神经对各种不同波长的光的感光灵敏度不一样,能量相同而波长不同的光,在人眼中引起的视觉强度不相同。国际照明委员会(CIE)用平均值的方法,确定了人眼对各种波长的光的平均相对灵敏度,称为光谱光视效率或视见函数 $V(\lambda)$ 。图 1-3 所示为明视觉和暗视觉两种情况下的人眼视见函数曲线。明视觉视见函数 $V(\lambda)$ 的最大值在 555 nm 处,此时 $V(\lambda)=1$,其他波长的 $V(\lambda)$ 都小于 1;暗视觉视见函数 $V'(\lambda)$ 的最大值在 507 nm 处,波长偏短。各种波长下的 $V(\lambda)$ 值可由 GB 3102.6—93 光及有关电磁辐射的量和单位中查出。表 1-4 列出了基本光度学的量、定义、单位和符号。

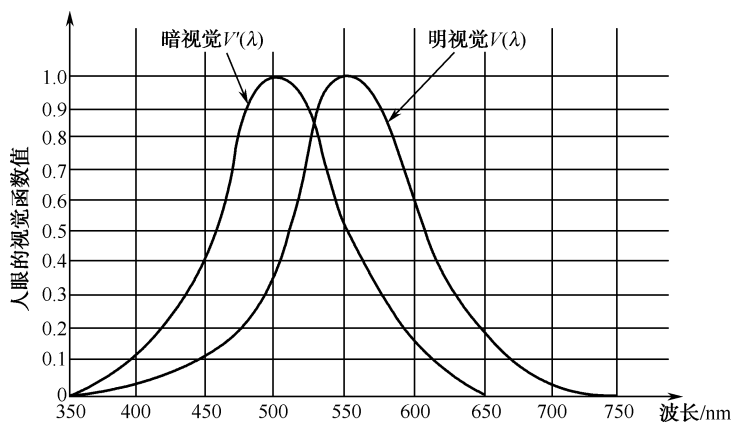


图 1-3 视觉典型的响应曲线

表 1-4 光度量和单位

度量的名称	符 号	定 义 式	单 位	单 位 符 号
光通量	Φ	$K_m \int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$	流明	lm
光出射度	M	$d\Phi/dA$	流明/米 ²	lm/m ²
光照度	E	$d\Phi/dA$	勒克斯 (流明/米 ²)	lx (lm/m ²)
发光强度	I	$d\Phi/d\omega$	坎德拉 (流明/球面度)	cd (lm/sr)
光亮度	L	$dI/(dA \cdot \cos\theta)$	坎德拉/米 ²	cd/m ²
光量	Q	$\int \Phi dt$	流明·秒	lm·s

若在波长 λ 到 $\lambda+d\lambda$ 间隔内光源的辐射通量为 $\Phi_{e,\lambda}d\lambda$, 则光通量的表达式为

$$\Phi = K_m \int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda = K_m \int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (1-7)$$

式中, K_m 为辐射度量与光度量之间的比例系数; $V(\lambda)$ 为人眼的光谱光视效率, 积分限的变换是波长小于 380 nm 和大于 780 nm 的不可见光, $V(\lambda)=0$ 。

式 (1-7) 中, Φ 是光通量, 其单位是流明 (lm); $\Phi_{e,\lambda}d\lambda$ 是辐射通量, 单位是瓦 (W); $V(\lambda)$ 是一个无量纲 (即量纲为 1) 的系数, 所以引进一个系数 K_m , 从而使两边的单位一致。显然, K_m 的单位为 lm/W, 其值为 683 lm/W, 称为最大光谱光视效能。它表示在波长为 555 nm 处,



即 $V(\lambda)=1$ 处, 与 1 W 的辐射通量相当的光通量为 683 lm ; 换句话说, 此时 1 lm 相当于 $\frac{1}{683}\text{ W}$ 。

对于点光源所产生的照度, 有下述的距离平方反比定律: 用点光源照明时, 被照面的照度与光源的发光强度 I 成正比, 而与被照面到光源的距离 l 的平方成反比, 即

$$E=I/l^2 \quad (1-8)$$

如果被照面不垂直于光线方向, 而其法线与光线的夹角为 θ , 则式 (1-8) 应改写成

$$E=I/l^2 \cdot \cos\theta \quad (1-9)$$

对于受到光照后成为面光源的表面来说, 其光出射度与光照度(两者的不同如图 1-4 所示)成正比, 即

$$M=\rho E \quad (1-10)$$

式中, ρ 为小于 1 的系数(漫反射率), 与表面的性质有关。

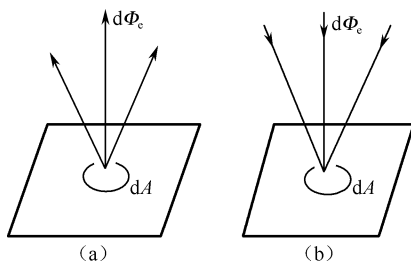


图 1-4 光出射度与光照度

对于余弦辐射体, 光亮度不随方向而变, 它和光出射度 M 之间存在着同式 (1-3) 相似的关系, 即

$$M=\pi L \quad (1-11)$$

必须注意, 不要把照度与亮度的概念相混淆, 它们是两个完全不同的物理量。照度表征受照面的明暗程度, 照度与光源至被照面的距离的平方成反比。而亮度是表征任何形式的光源或被照射物体表面是面光源时的发光特性。如果光源与观察者眼睛之间没有光吸收现象存在, 那么亮度值与两者间距离无关。

1.2 半导体物理基础

自然界中存在着气体、液体或固体, 而固体, 按其原子排列来说, 可以分成晶体与非晶体两类; 按导电能力, 则可分成导体、绝缘体和介于二者之间的半导体三种。

通常, 把电阻率在 $10^{-6} \sim 10^{-3}\ \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内的物质称为导体(如银、铜、铝、铁等金属); 电阻率在 $10^{12}\ \Omega \cdot \text{cm}$ 以上的物质称为绝缘体(如塑料、陶瓷、橡皮、石英玻璃等); 电阻率介于导体和绝缘体之间的物质则称为半导体。正是这种半导体, 具有重要的特殊的性能, 因而才得到广泛的应用。其特性是:

(1) 半导体的电阻温度系数一般是负的, 它对温度的变化非常敏感。根据这一特性, 制作了许多半导体热探测元件。

(2) 半导体的导电性能可受极微量杂质的影响而发生十分显著的变化。如纯硅在室温下的电导率为 $5 \times 10^{-6}\ \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, 当掺入硅原子数的百万分之一的杂质时, 其纯度虽仍高达 99.9999%,

但电导率却上升至 $2\ \Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，几乎增加了 100 万倍！此外，随着所掺入的杂质的种类不同，可以得到相反导电类型的半导体。如在硅中掺入硼，可得到 P 型半导体；掺入锑可得到 N 型半导体等。

(3) 半导体的导电能力及性质会受热、光、电、磁等外界作用的影响而发生非常重要的变化。例如，沉积在绝缘基板上的硫化镉层不受光照时的阻抗可高达几十甚至几百 $\text{M}\Omega$ ，但一旦受到光照，电阻就会下降到几十 $\text{k}\Omega$ ，甚至更小。

常见的半导体材料有硅、锗、硒等元素半导体，砷化镓 (GaAs)、铝砷化镓 ($\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$)、锑化铟 (InSb)、硫化镉 (CdS) 和硫化铅 (PbS) 等化合物半导体，还有如氧化亚铜的氧化物半导体，如砷化镓-磷化镓固熔体半导体，以及有机半导体、玻璃半导体、稀土半导体等。利用半导体的特殊性质，可制成光敏器件、热敏器件、场效应器件、体效应器件、霍耳器件、红外接收器件、电荷耦合器件等，以及各种二极管、三极管、集成电路等。

1.2.1 半导体的能带

为了解释固体材料的不同导电特性，人们从电子能级的概念出发引入了能带理论，它是半导体物理的理论基础，应用能带理论可以解释发生在半导体中的各种物理现象和各种半导体器件的工作原理。

1. 原子中电子的能级

大家知道，原子是由一个带正电的原子核与一些带负电的电子所组成。这些电子环绕着原子核在各自的轨道上不停地运动着。根据量子论，电子运动有下面三个重要特点。

(1) 电子绕核运动，具有完全确定的能量，这种稳定的运动状态称为量子态。每一量子态所取的确定能量称为能级。图 1-5 是硅原子中电子绕核运动的轨道及与其相应的能级示意图。最里层的量子态，电子距原子核最近，受原子核束缚最强，能量最低。越外层的量子态，电子受原子核束缚越弱，能量越高。电子可以吸收能量从低能级跃迁到高能级上去。电子也可在一定条件下放出能量重新落回到低能级上来，但不可能有介于各能级之间的量子态存在。

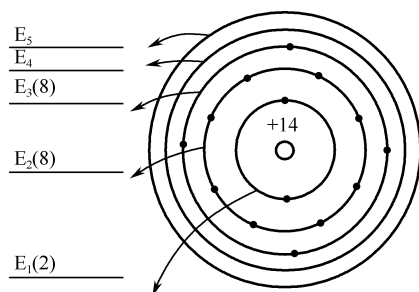


图 1-5 硅原子中电子绕核运动轨道及其相应能级示意图

(2) 由于微观粒子具有粒子与波动的两重性，因此严格说原子中的电子没有完全确定的轨道。这里的“轨道”所代表的是电子出现概率最大的一部分区域。

(3) 在一个原子或原子组成的系统中，不能有两个电子同属于一个量子态，即在每一个能级中，最多只能容纳两个自旋方向相反的电子，这就是泡利不相容原理。此外，电子首先填满

最低能级，而后依次向上填，直到所有电子填完为止。

2. 晶体中电子的能带

物质是由原子组成的，原子以一定的周期重复排列所构成的物体称为晶体。当原子结合成晶体时，因为原子之间的距离很近，不同原子之间的电子轨道（量子态）将发生不同程度的重叠。当然，晶体中两个相邻原子的最外层电子的轨道重叠最多，这些轨道的重叠，使电子可以从一个原子转移到另一个原子上去。结果，原来隶属于某一原子的电子，不再是此原子私有的了，而是可以在整个晶体中运动，成为整个晶体所共有，这种现象称为电子的共有化。越外层电子的重叠程度越大，且原子核对其的束缚越小，因此，只有最外层电子的共有化特征才是显著的。

晶体中的电子虽然可以从一个原子转移到另一个原子，但它只能在能量相同的量子态之间发生转移，所以，共有化的量子态与原子的能级之间存在着直接的对应关系，因此， N 个原子排列起来结合成晶体，原来分属于 N 个单个原子的相同能级必须对应分裂或属于整个晶体的 N 个能量稍有差别的能级，如图 1-6 所示。这些能级互相靠得很近，分布在一定的能量区域。将这能量区域中密集的能级形象地称为能带。由于能带中能级之间的能量差很小，所以通常可以把能带内的能级看成是连续的。在一般的原子中，内层电子的能级都是被电子填满的。当原子组成晶体后，与这些内层的能级相对应的能带也是被电子所填满的。能量最高的是价电子填满的能带，称为价带。价带以上的能带基本上是空的，其中最低的带称为导带。价带与导带之间的区域则称为禁带。

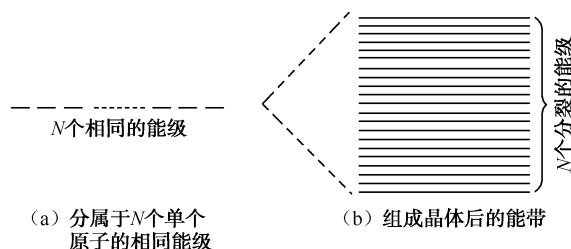


图 1-6 N 个原子结合成晶体前后的能级状态变化

绝缘体、半导体、导体的能带情况如图 1-7 所示。一般，绝缘体的禁带比较宽，价带被电子填满，而导带是空的。半导体的能带与绝缘体相似，在理想的绝对零度下，也有被电子填满的价带和全空的导带，但其禁带比较窄。正因为如此，在一定的条件下，价带的电子容易被激发到导带中去，半导体的许多重要特性就是由此引起的。导体的能带情况有两种：一是它的价带没有被电子填满，即最高能量的电子只能填充价带的下半部分，而上半部分空着；二是它的价带与导带相重叠。

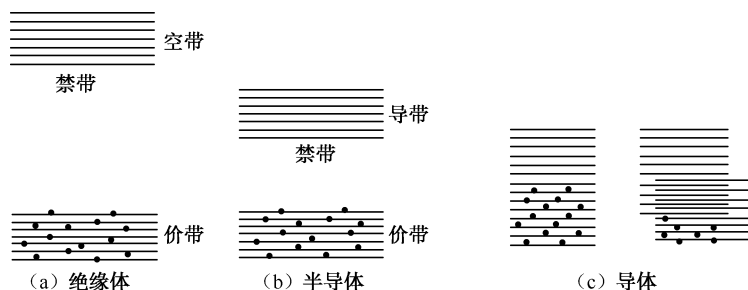


图 1-7 绝缘体、半导体、导体的能带

值得指出的是, 能带图并不实际存在, 只是用来说明电子的能量分布情况的。

3. 半导体的导电机构

在晶体中, 根据泡利不相容原理, 每个能级上最多能容纳两个电子。因此, 要改变晶体中电子的运动状态, 以便改变电子的运动能量, 使它跃迁到新的能级中去, 一般需要满足两个条件: 一是具有能向电子提供能量的外界作用; 二是电子要跃入的那个能级是空的。

由于导带中存在大量的空能级, 当有电场作用时, 导带电子能够得到能量而跃迁到空的能级中去, 即导带电子能够改变运动状态。这也就是说, 在电场的作用下, 导带电子能够产生定向运动而形成电流, 所以导带电子是可以导电的, 而填满电子的价带中的电子是不能导电的。如果价带中的一些电子在外界作用下跃迁到导带, 那么在价带中就留下了缺乏电子的空位。可以设想, 在外加电场作用下, 邻近能级的电子可以跃入这些空位, 而在这些电子原来的能级上又出现了新的空位。以后, 其他电子又可以再跃入这些新的空位, 这就好像空位在价带中移动一样, 只不过其移动方向与电子相反罢了。因此, 对于有电子空位的价带, 其电子运动状态就不再是不可改变的了。在外加电场的作用下, 有些电子在原来热运动上叠加了定向运动, 从而形成了电流。

导带和价带电子的导电情况是有区别的, 即导带的电子愈多, 其导电能力愈强; 而价带的电子的空位愈多, 即电子愈少, 其导电能力也愈强。为了处理方便, 我们把价带的电子空位想象为带正电的粒子。显然, 它所带的电量与电子相等, 符号相反。在电场作用下, 它可以自由地在晶体中运动, 像导带中的电子一样能够起导电作用, 这种价带中的电子空位, 我们通常称之为空穴。由于电子和空穴都能导电, 一般把它们统称为载流子。

(1) 本征半导体的能带。完全纯净和结构完整的半导体称为本征半导体。它的能带图如图 1-8 所示。其中图 1-8 (a) 是假设在绝对零度时, 又不受光、电、磁等外界作用的本征半导体能带图。此时, 导带没有电子, 价带也没有空穴, 因此, 这时的本征半导体和绝缘体一样, 不能导电。但是, 由于半导体的禁带宽度 E_g 较小, 因而在热运动或其他外界因素的作用下, 价带的电子可激发跃迁到导带, 如图 1-8 (b) 所示, 这时, 导带有了电子, 价带也有了空穴, 本征半导体就有能力导电了。电子由价带直接激发跃迁到导带称为本征激发。对于本征半导体来说, 其载流子只能依靠本征激发产生, 因此, 导带的电子和价带的空穴是相等的。这就是本征半导体的导电机构的特性。

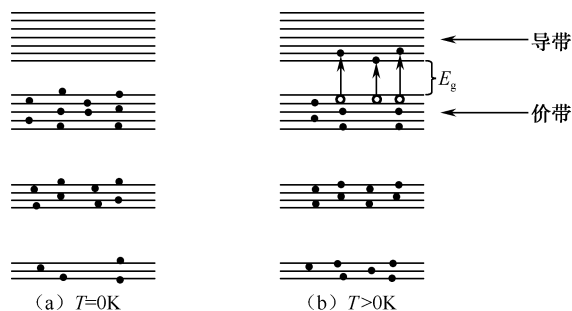


图 1-8 本征半导体能带图

(2) 杂质半导体的能带。实际上, 晶体总是含有缺陷和杂质的, 而杂质原子上的能级和晶体中其他原子不同, 它可以在晶体能级的禁带中, 即束缚态的能量一般处在禁带中。如在 4 价

的硅或锗晶体中,掺入5价原子(如磷、砷、锑等)就可构成N型半导体。5个价电子中有4个价电子与硅原子形成共价键,多余的一个价电子不在价键中,因而容易跃迁到导带成为自由电子。具有这种特点的杂质称为施主杂质,因为它能施予电子。被束缚于施主上的电子的能量状态称为施主能级,如图1-9(a)所示。

如果用具有3个价电子的III族元素(如硼、铝、镓、铟等)的原子取代硅原子组成4个共价键时,尚缺一个电子,即存在一个空的电子能量状态,它能够从晶体的价带接受一个电子,这就等于向价带提供一个空位,这就构成了P型半导体。具有这种特点的杂质称为受主杂质,因为它能接受电子。受主的空能量状态称为受主能级,如图1-9(b)所示。

施主(或受主)能级上的电子(或空穴)跃迁到导带(或价带)中去的过程称为电离,这个过程所需的能量就是电离能。图1-9是半导体中杂质能级的示意图。图中 E 表示导带底, E_+ 表示价带顶。一般,施主能级离导带底较近,即杂质的束缚态能级略低于导带底。这样,常温下束缚态中的电子容易激发到导带而使导带中的电子远多于价带中的空穴。一般,受主能级离价带顶较近,即当在半导体中掺入某一杂质而使其束缚态略高于价带顶时,就可在常温下使价带中的电子激发到束缚态,因而使价带中的空穴远多于导带中的电子。由于杂质的电离能比禁带宽度小得多,所以杂质的种类和数量对半导体的导电性能影响很大。

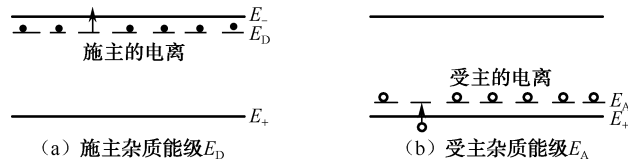


图1-9 半导体的杂质能级

显然,在N型半导体中,一般把电子 n 称为多数载流子,而空穴 p 称为少数载流子,即 $n \gg p$;而在P型半导体中,则与上相反,多数载流子 $p \gg n$ (少数载流子)。

1.2.2 热平衡与非平衡载流子及其运动

1. 热平衡载流子及费米能级 E_F

在不变的外界条件下,宏观体系自发地趋向于一种平衡状态,此时表征体系宏观性质的每一参数的数值都不随时间而变化即称为热平衡。这时电子占据某一能量状态 E 的概率 $f_n(E)$ 也是一定的。这个能量为 E 的能级被电子所占有的概率 $f_n(E)$ 是根据费米-狄拉克的统计理论得到的,称为费米-狄拉克分布函数,即

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}} \quad (1-12)$$

式中, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$,为玻耳兹曼常数; T 为绝对温度(单位为K); E_F 称为费米能级,是热平衡条件下的一个重要参数。当 $E = E_F$ 时,由式(1-12)得 $f_n(E) = 1/2$,即在能量等于费米能级的能级上,电子的占据概率为1/2;当 $E < E_F$ 时,则 $f_n(E) > 1/2$,即在能量低于 E_F 的能级上,电子的占据概率大于1/2;当 $E > E_F$ 时, $f_n(E) < 1/2$,即在能量高于 E_F 的能级上,电子的占据概率小于1/2。由此可见, E_F 是能级占有与未占有电子的分界线,因而可用来定性描述半导体中

载流子的分布。

显然, 空穴占据的概率 $f_p(E)$ 是不被电子占据的概率, 即

$$f_p(E) = 1 - f_n(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_F - E}{kT}}} \quad (1-13)$$

一般, 费米能级在禁带中, $E - E_F$ 比 kT 大得多。对导带能级, 室温条件下很容易满足 $(E - E_F) > 5kT$, 因此导带中电子占据的概率为

$$f_n(E) \approx \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right) \quad (1-14)$$

同理, 价带中空穴占据的概率为

$$f_p(E) \approx \exp\left(-\frac{E_F - E_+}{kT}\right) \quad (1-15)$$

从电子的能级密度和统计分布函数, 我们可推导出半导体导带的电子浓度 n 和价带空穴浓度 p 分别为

$$n = N_- \times \exp\left(-\frac{E_- - E_F}{kT}\right); \quad p = N_+ \times \exp\left(-\frac{E_F - E_+}{kT}\right) \quad (1-16)$$

式中, $N_- = 2\left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$ 为导带的有效能级密度; $N_+ = 2\left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$ 为价带的有效能级密度;

m_n^* 为自由电子的有效质量; m_p^* 为自由空穴的有效质量; h 为普朗克常数。

把式 (1-16) 的 n 与 p 相乘, 可得

$$np = N_- N_+ \exp\left(-\frac{E_- - E_+}{kT}\right) = N_- N_+ \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (1-17)$$

式中, $E_g = E_- - E_+$ 为禁带宽度, 它是半导体的一个重要参数。

在本征半导体中, 电子和空穴浓度相等, 即 $n=p=n_i$, 则半导体的本征载流子浓度

$$n_i = (N_- N_+)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (1-18)$$

由式 (1-18) 可以看到, 在热平衡时, 两种载流子浓度的乘积必定等于一个常数, 即本征载流子浓度的平方。本征载流子浓度 n_i 与温度有关, 随着温度升高, n_i 将迅速增大。但只要温度一定, $n_i^2 = np$ 也就一定。硅的 n_i 在 300 K 时为 $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。

对于本征半导体, 因为 $n=p$, 由式 (1-16) 可解得其费米能级为

$$E_F = \frac{1}{2}(E_- + E_+) + \frac{1}{2}kT \ln \frac{N_+}{N_-} \quad (1-19)$$

通常情况下,

$$N_- \approx N_+$$

这时

$$E_F = \frac{1}{2}(E_- + E_+) \quad (1-20)$$

由此可知, 本征半导体的费米能级 E_F 基本上位于禁带的中央, 如图 1-10 (a) 所示。

对于杂质半导体, 其费米能级 E_F 与本征半导体的 E_F 在禁带中的位置有所不同。根据统计理论的分析, 在极低温下, N 型半导体的费米能级位于施主能级和导带底的正中间,



如图 1-10 (b) 所示; P 型半导体的费米能级在受主能级与价带顶的正中间, 如图 1-10 (c) 所示。

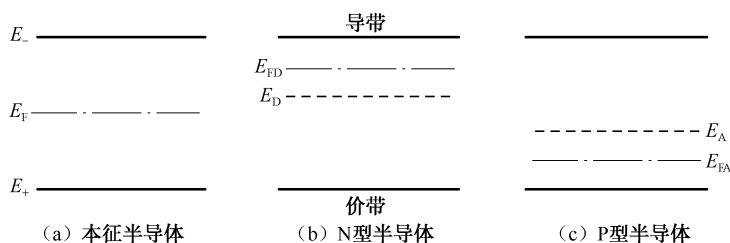


图 1-10 半导体中的费米能级

2. 非平衡载流子及其寿命 τ

半导体在热平衡状态下, 其载流子的浓度有一个恒定的数值。但在外界因素的作用下, 例如半导体接受光照, 由于光的激发, 电子和空穴的产生率大于复合率, 这就可能在导带和价带增加载流子 (电子和空穴) 的数目。这种增加的电子和空穴我们称为非平衡载流子, 并用 Δn 和 Δp 表示。这样, 在导带和价带中电子和空穴的浓度分别为

$$n = n_0 + \Delta n, \quad p = p_0 + \Delta p \quad (1-21)$$

式中, n_0 与 p_0 分别表示光照前一定温度下热平衡载流子的浓度。

(1) 非平衡载流子的寿命。非平衡载流子 Δn (或 Δp) 的复合率一般可表示为

$$\text{复合率} = \Delta n / \tau \quad (\text{或 } \Delta p / \tau) \quad (1-22)$$

式中, τ 为常数, 称为非平衡载流子的寿命, τ 的物理意义有如下三点。

① 寿命 τ 的数值标志着非平衡载流子复合的快慢。这可从式 (1-22) 可清楚地看到, 寿命 τ 越长, 复合率越小; 寿命 τ 越短, 复合率越大。

② τ 就是当非平衡载流子浓度衰减到原来的 $1/e$ 所需的时间。在没有外界作用下, 非平衡载流子浓度的变化率等于复合率 (这里只考虑 Δn , Δp 也有同样的形式), 即

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau} \quad (1-23)$$

式中, 负号表示复合作用使 Δn 随时间 t 减小。 Δn 是时间 t 的函数。从式 (1-23) 容易解得

$$\Delta n(t) = \Delta n(0) e^{-t/\tau} \quad (1-24)$$

式中, $\Delta n(0)$ 为 $t=0$ 时非平衡载流子的浓度。当 $t=\tau$ 时, 其浓度衰减到原来的 $1/e$ 。

$$\Delta n|_{t=\tau} = \Delta n(0) e^{-t/\tau} = \frac{\Delta n(0)}{e} \quad (1-25)$$

③ τ 是非平衡载流子的平均存在时间。非平衡载流子是逐步消失的, $\int_0^\infty \Delta n dt$ 为所有非平衡载流子存在时间的总和。而非平衡载流子的总数就是 $t=0$ 时的数值 $\Delta n(0)$ 。所以, 载流子平均存在的时间为

$$\frac{\int_0^\infty \Delta n dt}{\Delta n(0)} = \int_0^\infty e^{-t/\tau} dt = \tau \quad (1-26)$$

(2) 非平衡载流子的复合。

① 自由电子与自由空穴的直接复合, 即导带电子直接落在价带空穴的位置上, 而与空穴

结合失去其自由态的过程。通常,直接复合会辐射出光子来,这种光子的能量等于自由载流子复合时所放出的能量,其数值大致等于晶体禁带宽度。

设 n 和 p 分别表示电子和空穴的浓度。每一个电子都有可能和空穴相遇而复合,它们的复合显然和它们的浓度成比例,因此,单位体积内电子、空穴的复合率为

$$\text{复合率} = \gamma np \quad (1-27)$$

式中, γ 称为复合系数或复合概率。在平衡的情况下,复合率等于产生率。则式(1-27)中的 n 和 p 即为平衡态载流子 n_0 和 p_0 。

② 通过复合中心的间接复合:由于半导体中晶体结构的不完整性和杂质的存在,在禁带内存在一些深能级,这些能级能俘获自由电子与自由空穴,从而使它们复合,这种深能级称为复合中心。自由载流子通过复合中心复合也往往产生光辐射。

间接复合过程包含两个步骤。

- 电子由导带落入复合中心;
- 电子由复合中心落入价带中的空穴。

从而完成了一对电子-空穴的复合,在每次复合之后,复合中心仍然保持原来的情况,因而它就能不断地起复合中心的作用。

(3) 陷阱效应。半导体内的杂质(或缺陷)除了决定材料的导电性质(起施主或受主的作用)和促进非平衡载流子的复合(决定非平衡载流子的寿命)等作用外,还有一种陷阱效应。它和复合中心的作用一样,也是存在着非平衡载流子情况下所发生的一种效应。

施主、受主、复合中心或者其他各种杂质能级,在平衡时都有一定数目的载流子,它们通过载流子的俘获和产生过程保持着平衡。由于某种原因,出现了非平衡载流子,使这种平衡遭到破坏,这就必然引起杂质能级上的电子数目变化。如果杂质能级上的电子增加,则说明杂质能级有收容电子的作用;如果杂质能级上的电子数减少,则说明杂质能级有收容空穴的作用。杂质能级的这种积累非平衡载流子的作用就叫做陷阱作用。通常,把有显著陷阱效应的杂质能级常简称为陷阱。有显著陷阱效应的典型陷阱有很不相同的电子和空穴的俘获概率:如果某杂质能级俘获电子的概率远大于俘获空穴的概率,则该杂质能级可称为电子的陷阱;反之,可称为空穴的陷阱。

由于陷阱的存在,直接影响着半导体的一些性质。陷阱能俘获电子或空穴而不使它们复合,就增长了载流子的存在时间,这些被陷载流子过一段时间后,在一定条件下,又会重新被激发到导带(或价带),这时才能通过一定的复合机构复合,这样就显著地增长了非平衡到平衡的整个弛豫过程(过渡需要的时间称为弛豫时间)。在陷阱中的载流子被激发成自由载流子后,可能通过复合机构复合,但也可能再次为陷阱所俘获。多次陷落更加延长了弛豫时间。少数载流子陷阱阻碍了少数载流子与多数载流子的复合,因而增加了多数载流子的寿命,从而增加了定态光电导的灵敏度。多数载流子陷阱的存在,减少了多数载流子的数目,当然也就减少了定态光电导的灵敏度。

3. 载流子的运动

半导体中存在能够自由导电的电子和空穴,在外界因素作用下,半导体又会产生非平衡电子和空穴,这些载流子的运动形式有如下两种。

(1) 扩散运动。扩散运动是在载流子浓度不均匀的情况下,载流子无规则热运动的自然结果,它不是由电场力的推动而产生的。我们把载流子由热运动造成的从高浓度处向低浓度处的

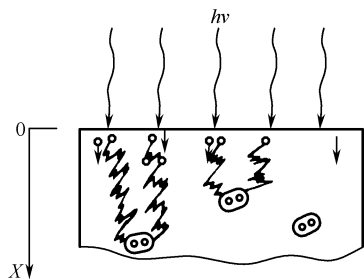


图 1-11 均匀半导体中载流子的扩散

迁移运动称为扩散运动。对于杂质均匀分布的半导体，其平衡载流子的浓度分布也是均匀的。因此，不会有平衡载流子的扩散，这时只考虑非平衡载流子的扩散。当然，对于杂质分布不均匀的半导体，需要同时考虑平衡载流子和非平衡载流子的扩散。

现研究一维稳定扩散的情形。例如，光均匀地照射一块均匀的半导体，如图 1-11 所示。假设光在表面很薄的一层内几乎全部被吸收，而非平衡载流子的产生也局限于这个薄层内。由图可见，在 $x=0$ 处，因光

照而产生的非平衡载流子浓度为 $\Delta p(0)$ 或 $\Delta n(0)$ ，由于在 x 方向存在浓度梯度，光生载流子将沿 x 方向扩散，最后在体内复合而消失。只要入射光保持不变，在 $x=0$ 处 $\Delta p(0)$ 与 $\Delta n(0)$ 也将不变。

$$j_n = -D_n \frac{d(\Delta n)}{dx}; \quad j_p = -D_p \frac{d(\Delta p)}{dx} \quad (1-28)$$

式中， j_n 和 j_p 分别为电子和空穴的扩散电流密度； D_n 和 D_p 分别为电子和空穴的扩散系数；负号表示扩散流的方向与浓度梯度方向相反。

(2) 漂移运动。漂移运动是载流子在电场的加速作用下的一种定向的运动。半导体中晶格原子和杂质离子在晶格点阵位置附近做热运动，而载流子则在晶格间做不规则的热运动，并在运动过程中不断与原子和杂质离子发生碰撞，从而改变其运动速度的大小和方向，这种现象称为散射。当存在外加电场时，使载流子做定向的漂移运动。而由于散射作用，载流子的漂移运动在恒定的电场下具有一个稳定的平均漂移速度。在 N 型半导体中，漂移所引起的电流密度为

$$j = nqv \quad (1-29)$$

式中， j 为电流密度； n 为载流子密度； q 为电子电荷； v 为载流子的平均漂移速度。欧姆定律的微分形式为

$$j = \sigma \varepsilon \quad (1-30)$$

式中， σ 为电导率； ε 为电场强度。由此可知，一定的电场强度，就有一定值的电流密度，因而也就有一定值的平均漂移速度，即一定值的 ε 对应于一定值的 v 。实际上，载流子密度一般不因电场的存在而改变，只有在特殊情况下，当电场强到改变能级或使载流子加速到产生碰撞电离，才会引起载流子密度的变化。因此，电场强度与平均漂移速度关系为

$$v = \mu \varepsilon \quad (1-31)$$

式中， μ 称为迁移率，它表示载流子在单位电场下所取得的漂移速度，其单位是 $\text{cm}^2 / \text{s} \cdot \text{V}$ 。显然，由上述三个公式可得

$$\sigma = nq\mu \quad (1-32)$$

在电场强度 ε 的作用下，载流子所得到的加速度 a 为

$$a = q\varepsilon / m^* \quad (1-33)$$

式中， m^* 为载流子的有效质量； q 为载流子所带的电荷 (C)。载流子在漂移运动中，因为散射作用，在每次碰撞之后漂移速度就下降为零。如果两次碰撞之间的平均自由时间为 τ_f ，则 τ_f 以后载流子的平均漂移速度 $v = a\tau_f = \tau_f q\varepsilon / m^*$ ，将式 (1-31) 代入可得

$$\mu = \tau_f q / m^* \quad (1-34)$$

由此看出, 迁移率与载流子的有效质量与平均自由时间 τ_f 有关, 而电子的有效质量 m_n^* 比空穴的有效质量 m_p^* 小, 所以电子的迁移率 μ_n 比空穴的迁移率 μ_p 大。

(3) 扩散运动和漂移运动同时存在。如扩散运动和漂移运动同时存在, 则载流子的扩散系数与迁移率之间有爱因斯坦关系。

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q}, \quad \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} \quad (1-35)$$

尽管爱因斯坦关系是在平衡情况下得到的, 但也适用于非平衡的情况。由式 (1-35) 可以看出, 同一种载流子的扩散系数与迁移率之间存在正比例关系, 其比例系数 kT/q 与温度有关, 它在室温 (300 K) 下为 0.026 V。因此, 很容易从载流子的迁移率来推算扩散系数。

由上述分析还可以知道, 在电场作用下, 任何载流子 (多数载流子与少数载流子) 均要做漂移运动。一般情况下, 少数载流子远少于多数载流子, 因此漂移电流主要是多数载流子的贡献。相反, 在扩散情况下, 只有光照所产生的少数载流子存在很大的浓度梯度, 所以对扩散电流的贡献主要是少数载流子。

1.2.3 半导体对光的吸收

物体受光照射, 一部分光被物体反射, 一部分光被物体吸收, 其余的光透过物体。那些被物体所吸收的光, 将改变物体的一些性能。下面分析一下半导体对光的几种吸收。

1. 本征吸收

半导体材料吸收光的原因, 在于光与处在各种状态的电子、晶格原子和杂质原子的相互作用。其中最主要的光吸收是由于光子的作用使电子由价带跃迁到导带而引起的, 这种吸收就称为本征吸收。电子从半导体价带跃迁到导带是一种本征激发, 所以本征光吸收也就是本征激发所对应的光吸收。由于激发, 自由电子与空穴的浓度都有了增加。由于价带顶和导带底之间存在有一定的禁带宽度 E_g , 因此, 只有在入射光子的能量大于该材料的禁带宽度时, 即 $h\nu \geq E_g$ 时, 才可能发生本征激发。对某一半导体而言, 本征吸收存在着一个相应于禁带宽度的长波限 λ_0 , 超过这个 λ_0 界限, 也就是频率更低时, 就不能引起本征吸收。 λ_0 的表达式为

$$\lambda_0 = ch/E_g = 1.24/E_g \quad (\mu\text{m}) \quad (1-36)$$

式中, c 为光在真空中的传播速度; h 为普朗克常数。

本征吸收是很强的吸收, 其吸收系数可达 $10^5/\text{cm}$ 的数量级, 因此, 实际的光吸收发生在约等于 10^{-6}cm 这一薄层内。这说明与光吸收有关的现象, 往往会受到表面状态的影响。

2. 杂质吸收

处于杂质能级中的电子与空穴, 也可以引起光的吸收。如图 1-12 (a) 所示, 电子吸收光子, 会从杂质能级跃迁到导带, 而价带中的电子吸收光子会跃入杂质能级, 在价带中留下空穴。在这种跃迁过程中, 光子能量与本征吸收一样, 也存在一个长波限 λ_0 , 即

$$\lambda_0 = ch/\Delta E_i = 1.24/\Delta E_i \quad (\mu\text{m}) \quad (1-37)$$

式中, ΔE_i 即杂质的电离能。这时, 引起杂质吸收的光子的最小能量应等于杂质的电离能, 即 $h\nu = \Delta E_i$ 。



由于杂质电离能比禁带宽度 E_g 小, 所以这种吸收出现在本征吸收限以外的长波区, 即在本征吸收限长波侧形成如图 1-12 (b) 所示的吸收带。也就是说, 杂质吸收的长波限比本征吸收的长波限长。

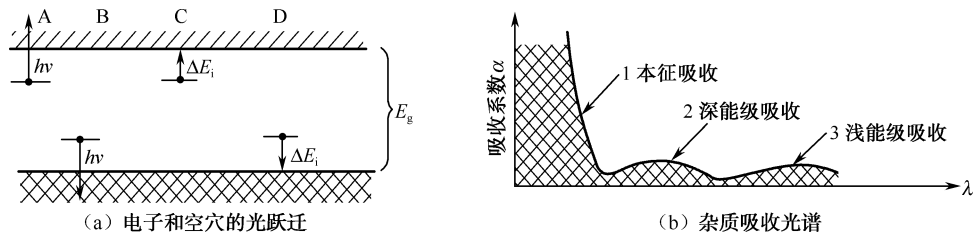


图 1-12 杂质吸收

不同的 ΔE_i 有不同的长波吸收限 λ_0 , 也就是说, 只要半导体中掺以合适的杂质, 这种吸收可以在很宽的波段内发生。例如, 锗掺杂, 可以制成截止波长为 $10\sim 130\ \mu\text{m}$ 范围的快速和高灵敏探测器的材料。

3. 自由载流子吸收

在半导体材料的红外吸收光谱中发现, 在本征吸收限长波侧还存在着强度随波长 λ 而增加的吸收。这种吸收是由于自由载流子在同一能带内不同能级之间的跃迁而引起的, 因此称为自由载流子吸收。

当半导体处于足够低的温度中时, 电子与晶格的联系显得非常微弱, 此时吸收的辐射使载流子在带内的能量分布发生显著变化。这种现象虽不引起载流子浓度的变化, 但由于电子的迁移率依赖于能量, 所以上述过程导致迁移率改变, 从而使这种吸收引起电导率的改变。一般吸收系数 α 与 λ 的关系 (这个关系曲线通常称为物质的吸收光谱) 为

$$\alpha \propto \lambda^n \quad (1-38)$$

按散射理论考虑, $n=2$, 实际 n 值在 $1.6\sim 2.2$ 之间。若杂质含量很大, 则 n 可变到 3.5 左右。半导体中光子与自由载流子之间发生的动量传递称为光子牵引效应。

4. 激子吸收

在某些情况下, 电子在价带中空穴库仑场的束缚下运动, 形成可动的电子-空穴对, 称为激子。激子的能量小于自由电子的能量, 因此能级处在禁带中。激子作为一个整体可以在晶格内自由运动, 然而它是电中性的, 不能产生电流。

若价带中的电子吸收光子而形成激子时, 所吸收光子的波长要比长波限更大些, 即在长波限的长波侧形成一些很尖锐的吸收线, 每条谱线对应于一定的激发态 ($n=1$ 时为基态, $n>1$ 时为受激发)。

5. 晶格吸收

在这种吸收过程中, 光子直接转变成晶格原子的振动。由于晶体中晶格的振动也是量子化的, 即能量的改变量只能取某一些能量值 $h\nu$ 的整数倍。

晶格吸收的光谱范围与晶格振动频率在同一数量级, 通常波长在 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间。

1.2.4 半导体的 PN 结

由上可知,半导体的电学性质在很大的程度上取决于所含杂质的种类和数量。如果把 P 型、N 型、本征 (i 型) 半导体配合起来,结成不均匀的半导体,可制造出各种半导体器件。这里所说的结合,即指一个单晶体内部根据杂质的种类和含量的不同而形成的接触区域,如 Pi 结、Ni 结、PN 结等。所谓“结”,严格地说是指其中的过渡区。

1. PN 结原理

PN 结是将 P 型杂质和 N 型杂质分别对半导体掺杂而成的。一般把 P 型区到 N 型区之间的过渡区域称为 PN 结。在 PN 结的形成过程中,由于空穴浓度在 P 区比 N 区高,而电子浓度在 N 区比 P 区高。这样,在 PN 结界面附近就形成了电子和空穴的浓度差,使 P 区的空穴向 N 区扩散, N 区的电子向 P 区扩散。这种扩散运动的结果,如图 1-13 (a) 所示,在结与 P 区界面处出现了电子的积聚,结与 N 区界面处出现了空穴的积聚。也就是说,在结区中形成了由 N 区指向 P 区的内建电场 ϵ 。这个电场的出现将产生载流子的漂移运动。

(1) 热平衡下的 PN 结。当 PN 结处于热平衡时,通过扩散流等于漂移流可以推导出

$$qV_D = E_{F_N} - E_{F_P} \quad (1-39)$$

式中, V_D 通常称为接触电势差或内建电势,它是结区出现的电势差; qV_D 则称为势垒高度; E_{F_N} 和 E_{F_P} 分别表示 N 型和 P 型半导体中的费米能级。所以,式 (1-39) 表示 PN 结在热平衡下,它们的势垒高度 qV_D 为 N 型和 P 型半导体原费米能级之差。由图 1-13 (c) 可以看出,由于热平衡时 N 型半导体与 P 型半导体有相同的化学势,因此有统一的费米能级,即平衡过程实际上将两个费米能级拉平了。

(2) 非平衡态下的 PN 结。非平衡态下的 PN 结的能带如图 1-14 所示。用 n 、 p 表示非平衡状态下的电子和空穴浓度; n_0 与 p_0 表示平衡状态下的电子和空穴浓度; Δn 、 Δp 表示因光照而增加的载流子数。它们之间有如式 (1-21) 所示的关系。由于电中性的要求, $\Delta n = \Delta p$ 。在小信号的情况下, $\Delta n = \Delta p \ll n_0$ (或 p_0)。利用式 (1-16) 和式 (1-17) 可得

$$np = n_i^2 e^{qV/kT} \quad (1-40)$$

式中, $qV = E_{F_-} - E_{F_+}$, E_{F_-} 和 E_{F_+} 分别表示在非平衡状态下的电子与空穴的费米能级,称为准费米能级。

由式 (1-40) 看出,在非平衡状态下,两种载流子浓度的乘积等于平衡态下两种载流子浓度的乘积再乘上一个指数因子 $e^{qV/kT}$ 。此因子可以是 1,也可以大于或小于 1。当 $V=0$ 时,即平衡态, $np = n_i^2 = n_0 p_0$; 当 $V>0$ 时,即在 PN 结上加正向电压 (或光照),此时 $np > n_i^2$,说明载流子的浓度增加了,增加的载流子形成结的正向电流;当 $V<0$ 时,即 PN 结加反向电压,此时 $np < n_i^2$,说明载流子比平衡时减少了,减少的载流子将形成结的一部分反向电流。

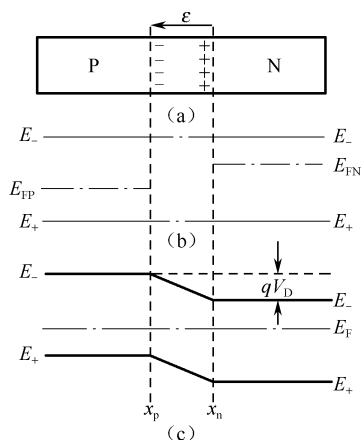


图 1-13 热平衡下的 PN 结

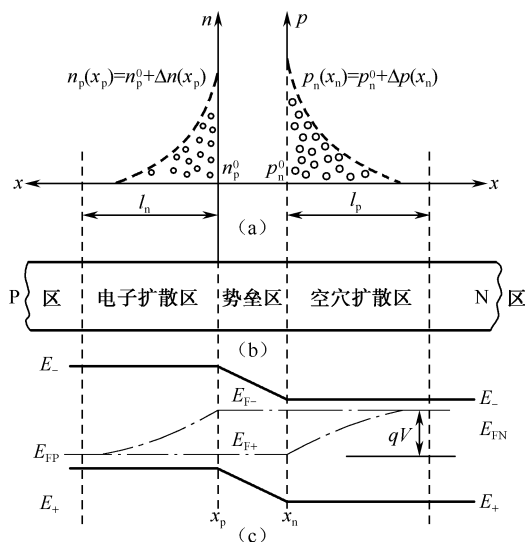


图 1-14 非平衡下的 PN 结能带图

PN 结的电流大小可以通过对 PN 结任一截面的电流来求得, 现看通过图 1-14 中 x_p 处的电流。当施加小于 V_D 的正向电压时, 即外加电压抵消一部分 V_D 而使势垒降低, 于是就出现了两部分电流: 一是从 N 区向 P 区注入的电子电流 $I_n(x_n)$; 一是由 P 区向 N 区注入的空穴电流 $I_p(x_p)$, 若势垒区中无复合, 则 $I_n(x_n) = I_n(x_p)$ 和 $I_p(x_n) = I_p(x_p)$ 。这样, 问题可以简化为纯扩散电流。由此可推证出通过 x_p 处的电流, 即通过 PN 结的电流。

$$I = I_p(x_p) + I_n(x_p) = I_0(e^{qV/KT} - 1) \quad (1-41)$$

式中, I_0 为反向饱和电流, 是温度的函数。式 (1-41) 就是 PN 结的伏-安特性式, 是分析所有 PN 结器件的最基本公式。由于是理想情况下得到的, 因此是理想 PN 结的电流-电压特性。

2. 半导体异质结

由两种不同质的半导体材料接触而组成的结, 称为半导体异质结。这种结构不仅改变了半导体的禁带宽度, 其他如能带结构、载流子有效质量、迁移率等也发生了变化, 从而为半导体物理的研究及实际应用开拓了一个新的领域。现在, 利用异质结已经制造出许多光电器件, 如注入式激光器、发光二极管和太阳能电池等各种类型的光电器件。异质结的构成, 不只限于两种不同的半导体材料, 对于由金属、绝缘体与半导体构成的结构也可称为异质结, 如 Ge-GaAs 和 ZnS-Pt、ZnSeAl-Au、Ge-Si、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-GaAs}$ 等。显然, 异质结是同质结的引申和发展, 而同质结是异质结的特殊情况。

当两种不同的半导体材料构成异质结时, 由于它们的晶格常数、电子亲和能与热膨胀系数等各有差异, 因此界面处能带的弯曲、界面态密度及势垒宽度等将受到极大的影响。目前, 对半导体异质结的研究, 着重于它的电流-电压特性及电流的输运机理。在解释异质结性质的模型中, 最基本的是由安徒生 (Anderson) 提出的理想模型。他做了这样两个假设: 一是构成异质结的两种材料晶格是完全匹配的, 即它们的晶格结构、晶格常数及热膨胀系数相同; 二是有不同的禁带宽度 E_g 、介电常数 ϵ 、功函数 ϕ 及电子亲和能 θ 。

从以上假设可以得到这样的结论: 用上述材料构成的异质结, 不存在界面态。因此, 势垒

区的复合可忽略, 电流全部是由越过导带或价带的势垒而注入的载流子所引起的扩散流。这样, 异质结的讨论, 可简化为用类似同质结的理论来进行。

(1) 异质结的能带结构。由于构成异质结的两种材料的物理性质有质的区别, 这就导致了异质结比同质结有更复杂的能带结构及产生一些同质结所没有的特殊物理性能。实际上, 构成异质结的两种材料的晶格不会是完全匹配的, 因此有必要引进一个晶格失配系数为

$$\text{晶格失配系数} = \frac{2|\alpha_1 - \alpha_2|}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (1-42)$$

式中, α_1 、 α_2 分别为两种材料的晶格常数。我们将晶格失配小于 1% 的异质结看做晶格匹配异质结。由 P 型锗和 N 型砷化镓组成的异质结的晶格失配小于 1%。表 1-5 是这种异质结的一些主要参数。图 1-15 就是利用上述参数得到的能带图。其中图 1-15 (a) 是两种材料的独立能带图; 图 1-15 (b) 是两种材料组成异质结后, 在平衡情况下的能带图。

表 1-5 N · GaAs-P · Ge 异质结材料参数

参 数	符 号	单 位	GaAs	Ge
禁带宽度	E_g	eV	1.45	0.7
电子亲和势	θ	eV	4.07	4.13
净施主	$N_D - N_A$	cm^{-3}	10^{16}	
净受主	$N_A - N_D$	cm^{-3}		3×10^{16}
功函数	ϕ	eV	4.17	4.69
晶格常数	α	nm	0.5654	0.5658
相对介电常数	ϵ		11.5	16

当 N · GaAs 和 P · Ge 构成异质结时, 它们的能带边缘将是不连续的, 如图 1-15 所示。

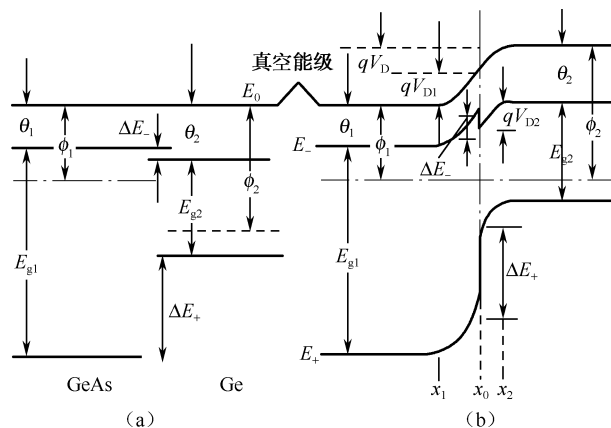


图 1-15 N · GaAs-P · Ge 异质结能带图

由于费米能级的差别, 必将导致电荷的转移, 电子从 N 型砷化镓移向 P 型锗, 而空穴则由 P 型锗向 N 型砷化镓转移, 从而在异质结内产生内建电场 (电势用 V_D 表示)。内建电场阻止电子与空穴的进一步转移, 达到平衡态, 出现统一的费米能级 E_F 。这样, P · Ge 内靠近结

区附近形成局部的空穴耗尽区,使能带边向下弯曲。同时, $N \cdot \text{GaAs}$ 也发生相应的电荷再分布,使能带边向上弯曲。

形成内建电场的电压 V_D (可理解为 PN 结中的接触电势,它的值为两种材料费米能级之差)为两个内建电场电压之和,即

$$V_D = V_{D1} + V_{D2} \quad (1-43)$$

或

$$qV_D = E_{F1} - E_{F2} \quad (1-44)$$

式中, V_{D1} 和 V_{D2} 分别为接触电势 V_D 在材料 1、2 中的降落。

由于异质结两边的物理参数不同,因此导带底 E_{-1} 、 E_{-2} 和价带顶 E_{+1} 、 E_{+2} 的位置不同,而具有差值 ΔE_{-} 及 ΔE_{+} 。又由于两种材料的掺杂不同,出现了与真空电子自由能级弯曲情况不一致的台阶。即导带和价带出现不连续性的跃变。其折叠的台阶为: $\Delta E = \theta_1 - \theta_2 = \Delta\theta$; $\Delta E_{+} = \Delta E_g - \Delta\theta$ 。这就导致导带和价带的势差不同,即电子与空穴的势差不同。实际上,导带底和价带顶的台阶 ΔE_{-} 和 ΔE_{+} 与材料的掺杂几乎无关,它反映的只是自由电荷从一种材料脱出进入另一种材料所必须给予的能量。这种能带的不连续性,就是研究半导体异质结能带模型的物理基础。

(2) 异质结的电流-电压特性。从安徒生假设出发,由于晶格匹配不存在界面态,因此电流主要是通过结区的扩散流。从图 1-15 可看出,阻止空穴从材料 2 向材料 1 扩散的势垒高度为 $q(V_{D2} + V_{D1}) + \Delta E_{+}$,阻止电子从材料 1 进入材料 2 的势垒高度为 qV_{D1} ,电子的反扩散势垒高度为 $\Delta E_{-} - qV_{D2}$ 。很明显,阻止电子扩散的势垒远比阻止空穴扩散的势垒小。因此,在所讨论的电子与空穴的扩散流中,只须考虑电子的扩散即可。在平衡态下,相反两个方向上的电子扩散流必然相等。由此推证出通过异质结的总电流为

$$I = I_0 e^{\frac{qV_{D1}}{kT}} \left(e^{\frac{qV_1}{kT}} - e^{-\frac{qV_2}{kT}} \right) \quad (1-45)$$

式中, $V_1 = K_1 U$, $V_2 = K_2 U$, 分别为外加电压 U 降落在材料 1 和 2 上的数值,而 K_1 与 K_2 表示 U 降落在不同材料上的比值,称为分配系数。实际上 I_0 是窄禁带材料中少数载流子的扩散系数及寿命的函数。在一般异质结中,外加电压大部分降落在轻掺杂的宽禁带材料中。因此, $V_1 > V_2$, 式 (1-45) 括号中的第二项可以略去。这样,在正向偏压下(如光照下)通过结的电流表达式为

$$I = I_0 \exp \left[-\frac{q(V_{D1} - K_1 U)}{kT} \right] \quad (1-46)$$

显然,正向电流随外加电压 U 的变化近似于指数规律。

1.2.5 半导体与金属的接触

半导体与金属的接触,可形成如下的几种情况。

1. 肖特基势垒

一般,金属和半导体的逸出功是不同的,因此它们的 E_F 值不同。当互相接触时,电子就从一个物体流向另一个而使两者都带电,并在界面上形成一个电偶层。金属内含有大量的可移动电子,因此可把偶极层电荷看成表面电荷,但半导体内的载流子数目有限,偶极层电荷必然

分布在一个相当深的范围内,即形成一个有一定厚度的空间电荷区。这个区域习惯称为没有自由载流子的耗尽层。

由于半导体边界上存在空间电荷,因而在能带图中表现为这一层里能带的弯曲。与金属接触并恢复平衡后,金属和半导体这一系统有一个统一的费米能级。在理想情况下,边界面上金属的费米能级与半导体导带底之间的距离不因接触而发生变化,这个距离称为金属-半导体的逸出功 Φ_{Bn} , 此值仅由接触材料的性质决定。此外,离边界相当远处,半导体中的导带与费米能级之间的能量差 qV_n 与接触前的值一样。这些条件决定了金属和半导体接触后会出现一个高为 V_s 的势垒。图 1-16(a) 示出了金属与 N 型半导体接触前后的能带图。半导体的逸出功 $\theta_A + qV_n$ 小于金属的逸出功 Φ_m , 其中 θ_A 是半导体表面的电子亲和能。由于这种 N 型半导体的费米能级高于金属的费米能级,接触后半导体中的电子流向金属,于是在接触面附近的 N 型半导体中的电子数量减少,形成一耗尽层。这时的势垒高度为

$$qV_s = \Phi_m - (\theta_A + qV_n) \quad (1-47)$$

金属-半导体逸出功为

$$\Phi_{Bn} = \Phi_m - \theta_A \quad (1-48)$$

这就是电子由金属进入半导体所遇到的势垒高度。

图 1-16(b) 所示的是金属与 P 型半导体接触前后的能带图。这时半导体的逸出功大于金属的逸出功,即这种 P 型半导体的费米能级低于金属的费米能级。接触后金属中的电子就要流向半导体与其中的多数载流子空穴中和,造成接触面附近的 P 型半导体中空穴数量减少,形成一耗尽层,成为空穴势垒。

当加正向偏压 V_F 时,就是使原有势垒降低的偏置,其能带关系如图 1-16(c) 和图 1-16(d) 所示。对金属和 N 型半导体接触而言,就是金属接正极, N 型半导体接负极;对金属和 P 型半导体接触而言,就是金属接负极, P 型半导体接正极。当加反向偏压 V_R 时,其偏置的能带图如图 1-16(e) 和图 1-16(f) 所示。

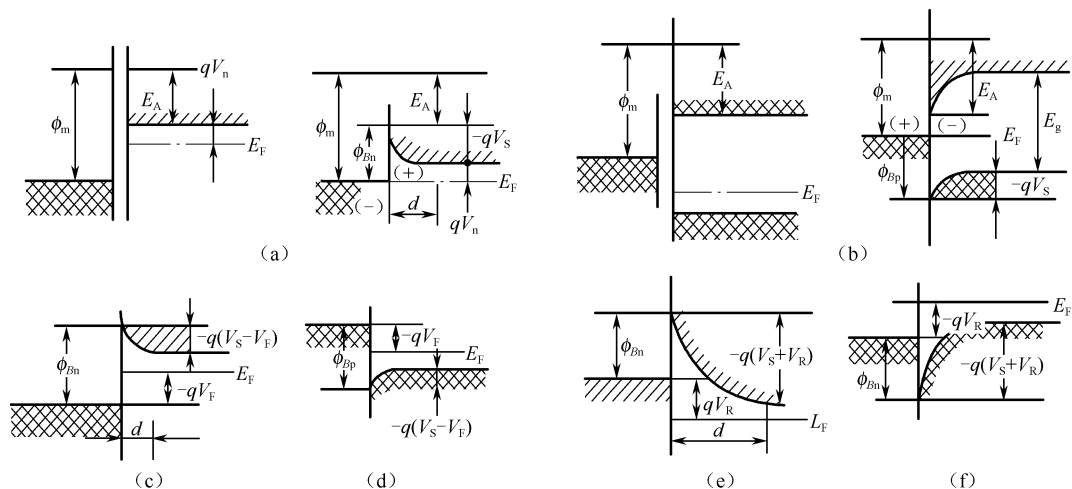


图 1-16 金属与半导体的接触及能带图

上面所述的势垒就称为肖特基势垒,能引起肖特基势垒的接触称为阻挡接触。当采用通常的近似时,可以得到与 PN 结完全类似的电流-电压表达式,即

$$I = I_0 \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right)$$

这里的反向电流 I_0 并非是由载流子的扩散造成的, 因为这种结的电流机理是多数载流子越过势垒的热离子发射。

2. 注入接触和欧姆接触

图 1-17 (a) 所示的金属与 N 型半导体的接触与上面讨论的情况相反, 这时金属的费米能级高于半导体的费米能级。接触后电子由金属注入半导体中, 使半导体边界层内侧的电子浓度大于体内数值, 得到一个由电子构成的负空间电荷区。这时, 若半导体的长度很短 (即一个薄层), 由注入引起的负空间电荷区有可能覆盖整个薄层, 电流受负空间电荷的强烈影响, 使电流-电压曲线呈超线性关系。若半导体的长度较长, 则就整体而言仍基本上服从欧姆定律。图 1-17 (b) 所示是金属与 P 型半导体的接触, 由于这里半导体的费米能级高于金属的费米能级, 接触后就有电子从半导体流入金属。由平衡条件 $pn=n_i^2$ 可知, 这将导致空穴密度的增加而形成一正的空间电荷区, 因此电流-电压曲线也呈超线性关系。上述这两种接触就称为注入接触。

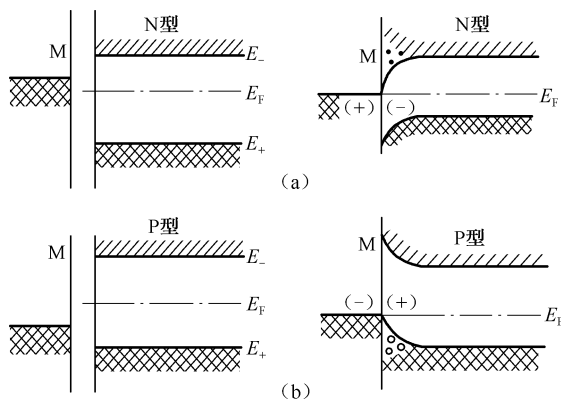


图 1-17 金属与半导体的注入接触

若金属与半导体的逸出功相同, 接触后没有电荷转移, 接触区无电场。加上外电场时, 电压-电流 (V-I) 关系服从欧姆定律, 这样的接触称为欧姆接触。在金属与半导体的实际接触中, 我们经常要用到欧姆接触, 但真正做到欧姆接触较难, 因而通常要用注入接触来代替。

1.3 光辐射电效应

光辐射电效应是将光辐射信号转换成电信号的效应, 分光电效应与热电效应两大类: 光电效应是光照射到物体上使物体发射电子、或导电率发生变化、或产生光电动势等的一种效应; 热电效应是物体吸收光辐射引起升温而使物体电阻值变化、或产生温差电动势、或释放电荷等的一种效应。下面分别讨论。

1.3.1 光电效应

光电效应可归纳为两大类。

(1) 物质受到光照后向外发射电子的现象称为外光电效应（或光电发射效应），这种效应多发生于金属和金属氧化物。

(2) 物质受到光照后所产生的光电子只在物质内部运动，而不会逸出物质外部的现象称为内光电效应，这种效应多发生于半导体内，它又可以分为光电导效应和光生伏特效应。

1. 光电发射效应

当被激发的电子能逸出光敏物质的表面而在外电场作用下形成光电子流，这就是外光电效应，也称为光电发射效应。在光电器件中，光电管、光电倍增管和某些特种光电器件，都是建立在外光电效应基础上的。外光电效应主要的基本定律和性质如下。

(1) 斯托列托夫（Ctojetob）定律（光电发射第一定律）。当入射光线的频谱成分不变（同一波长的单色光或者相同频谱成分的光线）时，光电阴极的饱和光电发射电流 I_k 与被阴极所吸收的光通量 Φ_k 成正比。即

$$I_k = S_k \Phi_k \quad (1-50)$$

式中， S_k 是表征光电发射灵敏度的系数，即后面器件中称的光电阴极的灵敏度。这个关系非常重要，因为它用光电探测器件进行光度测量、光电转换的一个最重要的依据。

(2) 爱因斯坦（Einstein）定律（光电发射第二定律）。发射出光电子的最大动能随入射光频率的增高而线性地增大，而与入射光的光强无关，即光电子发射的能量关系符合爱因斯坦公式。

$$h\nu = \left(\frac{1}{2} m_e v^2 \right)_{\max} + \phi_0 \quad (1-51)$$

式中， h 为普朗克常数； ν 为入射光的频率； m_e 为光电子的质量； v 表示出射光电子的速度； ϕ_0 为光电阴极的逸出功。

根据爱因斯坦提出的假说，每个电子的逸出都是由于吸收了一个光子能量的结果。而且一个光子的全部能量 $h\nu$ 都由辐射能转变成光电子的能量。因此，光愈强，也就是作用于阴极表面的量子数愈多，这样就会有较多的电子从阴极表面逸出。同时，入射光线的频率愈高，也就是说每个光子的能量愈大，阴极材料中处于最高能级的电子在取得这个能量，并克服位垒作用逸出界面之后，其具有的动能也较大。

(3) 光电发射的红限。在入射光线频谱范围内，光电阴极存在着临界波长。当光波波长等于这个临界波长时，光电子刚刚能从阴极逸出。这个波长通常称为光电发射的“红限”，也称为光电发射的阈波长（光电阴极的长波阈 λ_0 ）。显然，在红限处光电子的初速（即动能）应该为零。因此 $h\nu = \phi_0$ ，临界频率 $\nu_0 = \phi_0/h$ ，所以临界波长为

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{ch}{\phi_0} = \frac{1.24}{\phi_0} \quad (\mu\text{m}) \quad (1-52)$$

最短波长的可见光（380 nm）在表面逸出功（也称为功函数）不超过 3.2 eV 的阴极材料中产生光电发射。而最长波长的可见光（780 nm）则只有在功函数低于 1.6 eV 的阴极材料中才会产生光电发射。



(4) 光电发射的瞬时性。这是光电发射的一个重要特性,实验证明,光电发射的延迟时间不超过 $3 \times 10^{-13} \text{ s}$ 的数量级。因此,实际上可以认为光电发射是无惯性的,这就决定了外光电效应器件具有很高的频率响应。

以上的结论严格说来是在温度为绝对零度时才是正确的。因为随着温度的增加,阴极材料内电子的能量亦将提高,而有可能在原来的红限以下即已逸出表面。但是,在实际上由于温度提高时这种具有很大能量的电子数目为数很少。在高温场合实际测量光电发射时,因受仪器灵敏度的限制,爱因斯坦定律和红限的结论,对大多数金属来说仍是正确的。

最早的时候,认为光电发射效应只发生在阴极材料的表面,即阴极表面的单原子层或者离表面数十纳米的距离内。但在后来发现了灵敏度很高的阴极材料后,认为光电发射不仅发生在物体的表面层,而且还深入到阴极材料的深层,通常称为光电发射的体积效应。而前者则称为光电发射的表面效应。

2. 光电导效应

光电导效应是指半导体受光照射后,其内部产生光生载流子,使半导体中载流子数显著增加而电阻减小的现象。这种效应在大多数半导体和绝缘体都存在。由于金属的电子能态与半导体和绝缘体不同,在光照下电阻没有改变,因此不产生光电导效应。一般来说,大多数的硫化物、氧化物、卤化物都可发生光电导效应。特别是硫化物,例如 CdS 、 PbS 有显著的光电导效应,这些是二元素化合物,而三元素化合物 CdS-CdSe 固熔体也有显著的光电导效应,它们都可用作光电导器件的材料。

就光电器件而言,最重要的参数是灵敏度、弛豫时间(惰性)和光谱分布。

(1) 灵敏度。灵敏度通常指的是在一定条件下,单位照度所引起的光电流。由于各种器件使用的范围及条件不一致,因此灵敏度有各种不同的表示法。光电导体的灵敏度表示在一定光强下光电导的强弱。它可以用光电增益 G 来表示,根据定态条件下电子与空穴的产生率与复合率相等可推导出 G 。

$$G = \beta \tau / t_L \quad (1-53)$$

式中, β 为量子产额,即吸收一个光子所产生的电子空穴对数; τ 为光生载流子寿命; t_L 为载流子在光电导两极间的渡越时间,一般有

$$t_L = \frac{l}{\mu \varepsilon} = \frac{l^2}{\mu U} \quad (1-54)$$

将式(1-53)代入式(1-54)可得

$$G = \beta \tau \mu \frac{U}{l^2} \quad (1-55)$$

式中, l 为光电导体两极间距; μ 为迁移率; U 为外加电源电压。由式(1-55)可知,光电导体的非平衡载流子寿命 τ 越长,迁移率 μ 越大,光电导体的灵敏度(光电流或光电增益)就越高。而且,光电导体的灵敏度还与电极间距 l 的平方成反比,这在光电导器件(光敏电阻)的电极设计时有很大的参考意义。

如果光电导体中自由电子与空穴均参与导电时,这时的光电导器件的增益的表达式为

$$G = \beta (\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p) \frac{U}{l^2} \quad (1-56)$$

(2) 弛豫时间。光照射到样品后,光电导逐渐增加,最后达到定态;光照停止,光电导在

一段时间内逐渐消失。这种弛豫现象表现了光电导对光强变化反应的快慢。显然,光电导上升或下降的时间就是弛豫时间,也称为响应时间(惰性)。弛豫时间长,表示光电导反应慢,也称惯性大;弛豫时间短,即反应快,惯性小。从实际应用讲,光电导的弛豫决定了在迅速变化的光强下,一个光电器件能否有效工作的问题。例如,对周期变化的光强,光电器件的弛豫时间如果比周期长得多,那么就不能反映光强的变化。显然,光电导的弛豫表现在光强变化时,光生载流子的积累和消失的过程,因而还必须研究光生载流子的产生与复合。

在分析定态光电导和光强之间的关系时,通常讨论下面两种典型情况:①直线性光电导,即光电导与光强呈线性关系,如 Si、Ge、PbO 等许多材料至少在较低的光强下都具有这种性质;②抛物线性光电导,指的是光电导与光强的平方根成正比。有不少光电导体在低光强下属于直线性光电导,但在较高的光强下则为抛物线性光电导。上述两种情况的 Δn (或 Δp)与光强 I 的关系为

$$\Delta n = aI^\gamma \quad (1-57)$$

式中, γ 称为光电转换因子。通常,它与光强有关,因此一般指在某一光强范围内的 γ 值。对直线性光电导材料而言, $\gamma=1$;而抛物线性光电导材料的 $\gamma=1/2$ 。

在定态的情况下,如果光生载流子有确定的复合概率或寿命 τ ,对直线性光电导,可得

$$\Delta n/\tau = I_n \alpha \beta \quad (1-58)$$

式中, I_n 是以光子计算的入射光光强(即单位时间通过单位面积的光子数); α 为光电导体对光的吸收系数。由此可知,光生载流子的密度与光强成正比,电导率的增量与光强也成正比。对抛物线性光电导,我们必须假设复合率与光生载流子密度的平方成正比,即

$$\text{复合率} = b(\Delta n)^2 \quad (1-59)$$

式中, b 为比例系数,这时的定态条件为

$$b(\Delta n)^2 = I_n \alpha \beta \quad (1-60)$$

此时可见,光生载流子密度 Δn 及电导率的增量均与光强的平方根成比例。

直线性光电导的上升和下降曲线如图 1-18 所示。

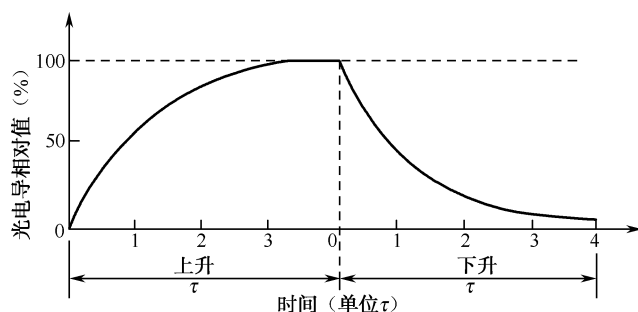


图 1-18 直线性光电导的上升和下降曲线

由图 1-18 可知,光电流都按指数规律上升和下降。在 $t=\tau$ 时,光电流上升到饱和值的 $(1-1/e)$,或下降到饱和值的 $1/e$,上升和下降是对称的。定义 $t=\tau$ 为光电流的弛豫时间。显然,直线性光电导的弛豫时间与光强无关。

抛物线性光电导的上升和下降曲线如图 1-19 所示。

由图 1-19 可知,此下降曲线是以横轴为渐近线的一条双曲线,因此称这样的下降规律为双曲线性衰减。其上升和下降都不对称,可用 $[1/(I_n \alpha \beta b)]^{1/2}$ 来表示弛豫时间。光照开始后,经

过这段时间,光电导增加到定态值的 $\tanh l=0.76$ 。而光照停止后,光电导在这段时间内减少到定态值的一半。显然,抛物线性光电导的弛豫时间与光强有关,光强愈高,弛豫时间愈短。

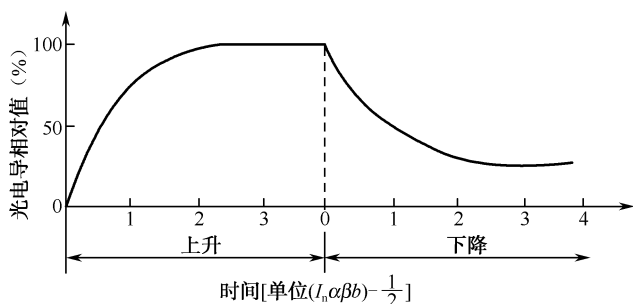


图 1-19 抛物线性光电导的上升和下降曲线

在上述直线性与抛物线性光电导中,光生载流子的定态值都可表示为产生率与弛豫时间的乘积,因此,惯性愈小(弛豫时间越短),则定态灵敏度也愈低;定态灵敏度愈高,弛豫时间也就愈长。这一关系在光敏电阻中都得到了证实,在实际应用中,既要求光敏电阻的灵敏度愈高愈好,又要求弛豫时间愈短愈好,显然这两者有一定的矛盾,因此,只能根据实际需要,折中地选取。

(3) 光电导的光谱分布。光电导的大小与照射光的波长有密切关系,测量这种光谱分布是确定半导体材料光电导特性的一个重要方面。如 PbS、Pb-Se、PbTe 可以有效地利用 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的红外光波段,而 CdS 可以有效地利用到 X 光的短波范围。此外,也只有首先确定了光谱分布,才能利用光电导来比较不同波长的光强。由本征激发产生的光电导称为本征光电导,由杂质激发所产生的光电导称为杂质光电导。

一些典型的本征光电导的光谱分布曲线,如图 1-20 所示。

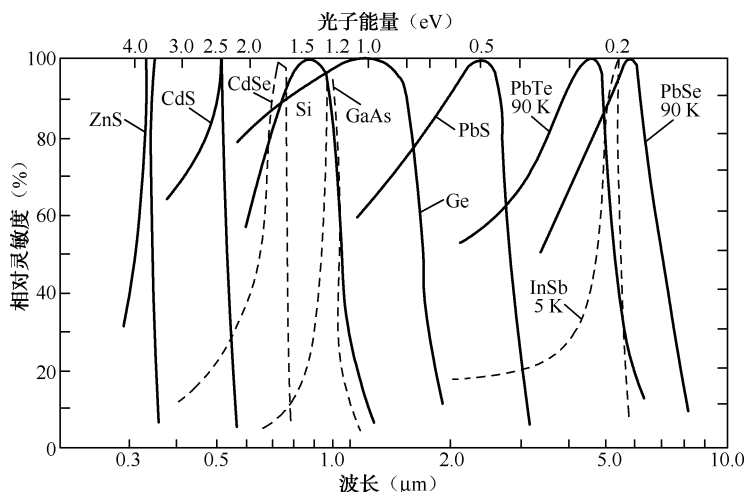


图 1-20 一些典型的本征光电导光谱分布曲线

由图 1-20 看出,不同的半导体光电导材料,由于有不同的禁带宽度,对应有不同的光谱响应曲线。每一条曲线都有一个峰值,峰值的长波方面曲线迅速下降,这是因为只有光子能量大于材料禁带宽度,才能激发产生电子-空穴对,引起本征光电导。在长波部分,当光子能量

小于材料的禁带宽度时,就不足以将电子从价带激发到导带,这时光电导将迅速下降。可以从各条曲线的长波限来确定半导体材料的禁带宽度。但从图中可以看出,曲线并不是垂直下降的,所以具体确定长波限存在一定的困难。茅司(Moss)认为应当选取光电导下降到一半的波长为长波限。

从图 1-20 可以看到,每条曲线在峰值的短波部分也在逐渐下降。这种下降是由于光生载流子在样品内分布情况改变的结果。波长短,样品对光的吸收系数大,光生载流子就愈集中于光照表面。这时受表面影响增大,表面能级、表面复合与电极等作用可能降低量子产额,减少载流子的迁移率与寿命,这都可以引起光电导的下降。

半导体杂质吸收光子将束缚在杂质能级上的电子或空穴激发成为自由的光生载流子,这时光子的能量必须等于或大于杂质的电离能。由于杂质的电离能比禁带宽度小,所以杂质光电导的光谱响应的波长比本征光电导的长。

由于杂质的原子的数目比起半导体材料本身的原子数目来一般小得多,所以杂质的光电导效应相对本征光电导来说也微弱得多。

由于杂质的电离能往往很小,因此对应的光电导长波限很长,实际上所涉及的能量在红外范围,所以,为了观察或应用杂质光电导,一般必须降低工作温度,以保证未受光激发时杂质上的电子与空穴基本上处于束缚状态,自由载流子数目很少(暗电导小)。例如,应用锗中价带以上 0.16 eV 的全能级所得到的光电导具有 8 μm 的长波限,在液态氮温度下具有优越的响应特性。锗中掺铜的红外探测器的响应可超过 29 μm ,灵敏度峰值在 24 μm 处,它在 17.5 K 时具有最佳的探测性能。

3. 光生伏特效应

光生伏特效应是光照使不均匀半导体或均匀半导体中光生电子和空穴在空间分开而产生电位差的现象。如何使光生电子和空穴在空间分开、移动和积聚呢?有下列 4 类。

- 由势垒效应产生的光生伏特效应;
- 由载流子浓度梯度引起的光生伏特效应;
- 用外加磁场产生的光生伏特效应;
- 由光子牵引效应引起的非势垒光伏效应。

下面主要介绍常用的由势垒效应产生的光生伏特效应,其余的 3 种光生伏特效应可参阅本书参考文献[1]《光电信息技术》的 1.3 节。

第 1 种光生伏特效应的机理,主要是由于存在着势垒,这种势垒可以是 PN 结、异质结,也可以是肖特基势垒。这 3 种类型的物理作用原理极为相似,因此特以大家熟悉的 PN 结为例,来说明由势垒效应产生的光生伏特效应的原理。

当 P 型和 N 型半导体形成 PN 结时,P 区和 N 区的多数载流子就会向对方扩散。平衡时有共同的费米能级 E_F ,在结中形成了由正负离子组成的空间电荷层或耗尽层。如图 1-21 所示。图 1-21 (a) 就是一个未加电压的 PN 结,它是一个由不可移动的带正、负电荷的离子组成的耗尽层,或称作势垒区。于是在耗尽层中形成了一个由 N 区指向 P 区的内建电场,其势垒高度为 qV_D 。当以适当波长的光照射 PN 结时,P 型和 N 型半导体材料将吸收光能。如果光子能量 $h\nu \geq E_g$ 时,则光子将被吸收,使价带中的电子受激跃迁到导带中,而在价带中留下空穴,如图 1-21 (b) 所示。这一过程即本征吸收,因光照射而在导带和价带中产生的电子和空穴就是光生载流子。

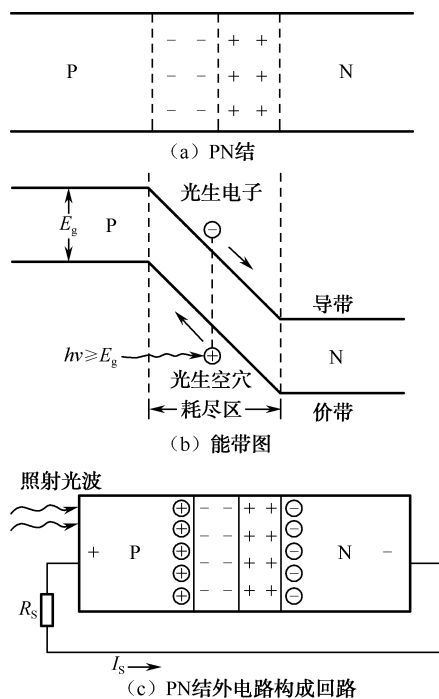


图 1-21 光生伏特效应原理

产生在耗尽层的光生载流子在内建电场的作用下作漂移运动：空穴向 P 区方向运动；电子向 N 区方向运动，它们在 PN 结的边缘被收集。此外，耗尽层外的光生少数载流子会发生扩散运动：P 区中的光生电子向 N 区扩散；N 区中的光生空穴向 P 区扩散。在内建电场的作用下分别快速漂移到对方区域。这样，在 P 区就出现了过剩空穴的积累，N 区出现了过剩电子的积累，从而产生一个与平衡 PN 结的内建电场方向相反的光生电场，此电场使原来的势垒高度 qV_D 降低。这样相当于向 PN 结加上一个正电压 V ，产生了一个极性如图 1-21 (c) 所示的光生电动势，即光生伏特效应。基于这一效应，如果将 PN 结的外电路构成回路，则外电路中就会出现信号电流，即由光照射激发的光电流，这时的 PN 结就起了电池的作用，这样做成的器件就是第 2 章中要讲的光电池。

在开路情形，所有被内建电场分开的光生载流子积聚于 PN 结，最大限度地补偿势垒，即建立起最高的光电压，称为开路光电压。在短路时，为内建电场分开的光生载流子沿外电路流动，不发生附加电荷的积聚且势垒高度不变，即光电压

为零，这时得到最大的光电流，称为短路光电流。

一般，当外接有限的负载时，结上的光电压可以达到某一 V 值，而流经负载的净电流将由于相反方向 (PN 结正向) 注入电流形式的漏电而小于短路光电流 I_{sc} 。因此在某个光电压 V 时的光电流为

$$I = I_{sc} - I_s(e^{qV/kT} - 1) \quad (1-61)$$

或者光电压为

$$V = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc} - I}{I_s} + 1 \right) \quad (1-62)$$

当 $I=0$ 时，可以确定开路光电压 V_{oc} 为

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right) \quad (1-63)$$

一般，光生电压随光强的增加而增大，且应满足 $V_{oc} < E_g/q$ 。但是，也有电压较高的光生伏特现象，这种光生电压比禁带宽度 E_g 要高出好几倍 ($V_{oc} > E_g$)，有时竟达 100 V 左右，这种现象称为反常光生伏特效应，如碲化镉 (CdTe) 薄膜与硫化锌 (ZnS) 晶体都有这种现象。对于这种现象目前还没有比较完善的理论解释，一般认为高电压是由于大量阻挡层的某种串联形成的。显然，这种效应大多发生在多晶体中。

1.3.2 热电效应

热电效应是材料吸收入射辐射产生温升,从而引起材料物理性质的变化而输出电信号。具体是将辐射能先转换为热能,然后把热能转换为电能。因为热电材料在没有受到辐射作用的情况下,器件与环境温度处于平衡状态。当辐射功率为 Φ_0 的热辐射入射到器件表面时,若表面的吸收系数为 α ,则器件吸收的热辐射功率为 $\alpha\Phi_0$,其中一部分功率使器件的温度升高;另一部分用于补偿器件与环境的热交换所损失的能量。根据能量守恒定律,热电材料吸收的热辐射功率应等于器件的内能增量与热交换能量之和。据此可推导出热电材料吸收辐射所引起的温度增加量为:

$$\Delta T = \frac{\alpha\Phi_0}{G(1+\omega^2\tau_T^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (1-64)$$

式中, $\tau_T=R_Q C_Q$, 为热敏材料的时间常数,其中 $R_Q=1/G$, 称为热阻, C_Q 为热容, G 为热导。式(1-64)说明:

(1) 热电材料吸收辐射能所引起的温升 ΔT 与吸收系数 α 成正比,这就是所有的热电探测器件都被涂黑的原因。

(2) ΔT 与入射的功率 Φ_0 成正比。

(3) ΔT 还与工作频率 f ($\omega=2\pi f$) 有关,当 f 越大时,其温升 ΔT 越小。

(4) ΔT 与热导 G 成反比,因而减小热导是提高温升及灵敏度的好方法。但热导与热时间常数成反比,提高温升将使器件的惯性增大,时间响应变坏,因而往往根据需要折中兼顾解决。

热电效应一般有温差电效应、热阻效应与热释电效应。

1. 温差电效应

当两种不同的金属 A 和 B 组成一个回路时。如果两种金属的连接点一端温度较高(称为热端),另一端温度较低(称为冷端)。在入射辐射作用下,在回路两端就产生了温差 ΔT ,由于温差便产生电位差 ΔU ,这就是温差电效应,即塞贝克热电效应(Seebeck Effect),如图 1-22(a)所示。温差电位差 ΔU 的大小和正负与材料的性质有关,通常由铋和碲所组成的一对金属有最大的温差电位差,约为 $100 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$,用来接触测量温度。如由铂(Pt)铑(Rh)合金组成的热电偶,其测量范围为 $-200^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$,测量准确度可高达 $1/1000^\circ\text{C}$ 。

图 1-22(b)可用来测量辐射能。图中 A、B 组成一对辐射热电偶, J_1 为热端; J_2 为冷端。其热端是用来吸收入射辐射的,因此在热端装有一块涂黑的金箔。当入射的辐射通量被涂黑的金箔吸收后,金箔温度升高,形成热端,产生温差电势,从而在回路中用检流计 G 就可检测到有电流 I 流过。目前,辐射热电偶大多采用半导体材料来组成,因为半导体材料具有较高的温差电位差,高的可达 $500 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

2. 热阻效应

凡材料吸收入射辐射后引起温升而使电阻值改变的效应(不同的温度对应不同的阻值),称为热阻效应或热导效应。显然,由于材料阻值的变化,可导致负载电阻两端电压的变化,因而可用来作成热敏器件,即热敏电阻。

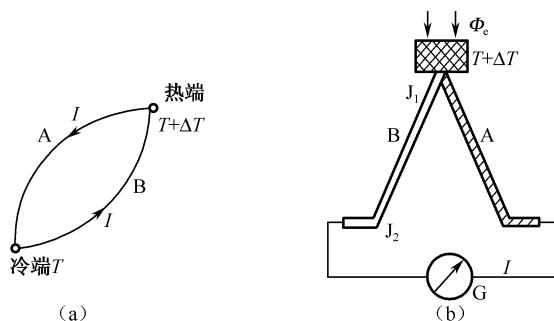


图 1-22 温差电效应

半导体材料对光的吸收除了直接产生光生载流子的本征吸收和杂质吸收外,还有不直接产生载流子的晶格吸收和自由电子吸收等,并且不同程度地转变为热能,引起晶格振动加剧,器件温度上升,即器件的电阻值发生变化。由于这种晶格吸收,对任何能量的辐射都可以使晶格振动加剧,只是吸收不同波长的辐射,晶格振动加剧的程度不同而已。

一般金属的能带结构外层无禁带,自由电子密度很大,以致外界光作用引起的自由电子密度相对变化较半导体而言可忽略不计。相反,吸收光辐射后使晶格振动加剧,妨碍了自由电子的定向运动。因此当光作用于金属元件使其温度升高,其电阻值还略有增加,也即由金属材料制成的热敏电阻具有正温度系数,而由半导体材料制成的热敏电阻具有负温度特性。

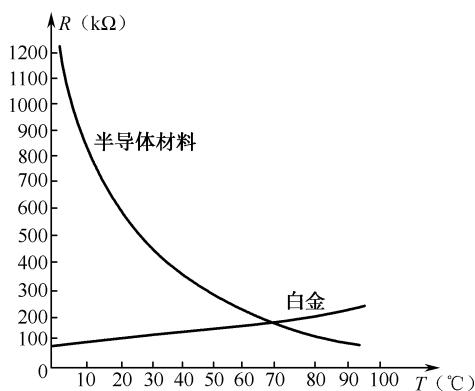


图 1-23 不同热敏材料的温度特性

图 1-23 分别给出了半导体材料和金属(白金)的温度特性曲线,白金的电阻温度系数为正值,大约为 $\pm 0.37\%$;而半导体材料,常常用金属氧化物如铜的氧化物,锰-镍-钴的氧化物,它们是粉末状的,用黏合剂黏合后,涂敷在瓷管或玻璃上烘干即成半导体材料,电阻温度系数为负值,为 $-3\% \sim -6\%$,为白金的 10 倍以上。这就是热敏电阻探测器常用半导体材料,而很少用金属的原因。

3. 热释电效应

我们知道,电介质也是由带电的粒子(电子、原子核)等组成的。在外加电场的情况下,带电的粒子也要受到电场力的作用,它们的运动也会发生一些变化。例如,加上一电压后,正电荷总是趋向阴极,负电荷趋向阳极,虽然其移动距离很小,其结果使电介质的一个表面带正电,相反的表面带负电(如图 1-24 所示),通常我们称这种现象为电极化。对大多数电介质来说,在电压除去后,极化状态随即消失,带电粒子的运动又回复到原来状态,如图 1-25 (a) 所示,即极化曲线通过中心 0 点。但是,有一类被称为“铁电体”的电介质,如图 1-25 (b) 所示,在外加电压除去后仍保持着极化状态,即仍保持一定的极化强度,这就是所谓自发极化。一般,铁电体的极化强度 P_s (单位面积上的电荷) 与温度有关,温度升高,极化强度减低。当升高到一定温度时,自发极化就突然消失,这个温度称为居里温度或居里点。在居里点以下,极化强度 P_s 是温度的函数。

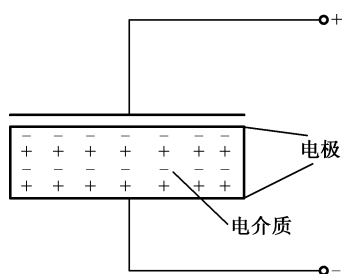


图 1-24 电介质的极化

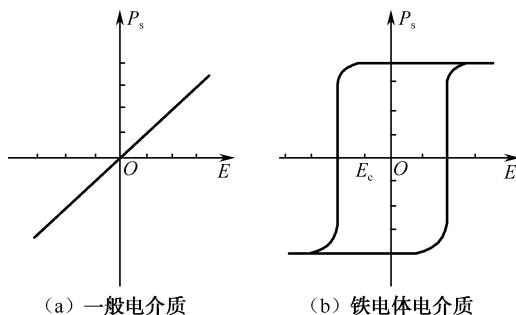


图 1-25 电介质的极化矢量与所加电场的关系

当红外辐射照射到已经极化了的铁电薄片上时，引起薄片的温度升高，因而表面电荷减少，这就相当于释放了一部分电荷。释放的电荷可用放大器转变成输出电压，这就是热释电效应。如果红外辐射继续照射，使铁电薄片的温度升高到新的平衡值，表面电荷也就达到新的平衡浓度，不再释放电荷，也就不再有输出信号，即只有在薄片温度的升降过程中才有输出信号。因此，在设计制造和应用热释电器件时，都要设法使铁电薄片具有最有利的温度变化。

实际上，产生热释电效应的原因是，在没有外电场作用时，热释电晶体具有非中心对称的晶体结构，即极性晶体内的分子在某个方向上的正、负电荷中心不重合，而具有电矩。当温度发生变化时，电矩的极性将发生变化。显然，在自然状态下，热释电晶体的电矩不为零，从而形成电偶极子。当相邻晶胞的电偶极子平行排列时，晶体将表现出宏观的电极化方向。外加电场能改变这种介质的自发极化矢量的方向。因为在外电场的作用下，无规则排列的自发极化矢量将趋于同一方向，从而形成所谓的单畴极化。当外加电场去除后，只有热释电材料（铁电体）才能保持单畴极化特性。显然，在交变的外电场作用下，会出现如图 1-25 (b) 所示的电滞回线，图中的 E_c 称为矫顽电场，即在该外电场作用下，无极性晶体的电极化强度为零。

对于经过单畴极化的热释电晶体，在垂直于极化方向的表面上，将由表面层的电偶极子构成相应的静电束缚电荷。因为自发极化强度是单位体积内的电矩矢量之和，所以面束缚电荷密度 σ 与自发极化强度 P_s 之间的关系可由下式确定

$$P_s = \frac{\sum \sigma \Delta A \Delta d}{Ad} = \sigma \quad (1-65)$$

式中， A 和 d 分别是热释电晶体的表面积和厚度。式 (1-65) 表明，热释电晶体的面束缚电荷密度 σ 在数值上等于它的自发极化强度 P_s 。但是，在温度恒定时，这些面束缚电荷被来自晶体内部或外部空气中的异性自由电荷所中和，因此觉察不出来，如图 1-26 (a) 所示。晶体内部自由电荷起中和作用的平均时间为

$$\tau = \varepsilon \rho \quad (1-66)$$

式中， ε 和 ρ 分别为晶体的介电常数与电阻率。大多数的热释电晶体材料的 τ 值在 $1 \sim 1\,000\text{ s}$ 之间，即热释电晶体材料表面上的面束缚电荷可以保持 $1 \sim 1\,000\text{ s}$ 的时间。因此，只要使热释电晶体的温度在面束缚电荷被中和掉之前因吸收辐射而发生变化，晶体的自发极化强度 P_s 就会随温度 T 的变化而变化，相应的面束缚电荷也随之变化，如图 1-26 (b) 所示。这一过程的平均作用时间很短，约为 10^{-12} s 。

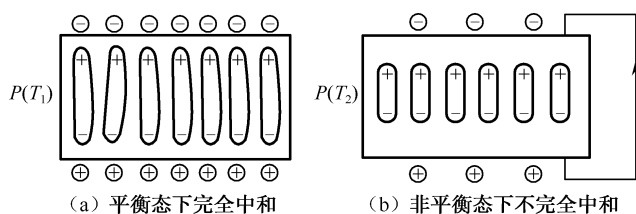


图 1-26 热释电晶体内部电偶极子和外部自由电荷的补偿情况

1.4 安防技术学科性质及由此产生的基本知识概念混淆与错误

一直到现在,安防界的权威人士对安防监控技术的学科性质还认识不清,因而制订安防专业的教学计划时,都没有开设光电信息技术这一安防技术的基础课程,所以在安防领域的专家与技术人员撰写的文章与安防书籍中,出现了不该有的 150 条安防技术基本知识概念混淆不清与错误的问题。其中最典型的是对光电成像系统的分辨率与分辨力的混淆问题,如公安部上海 3 所某技术人员在 A&S 杂志上发表了“安防摄像机分辨力指标分析和测试方法探讨”的错误文章(后被道客巴巴、豆丁网等错误转载),充分暴露了对分辨率与分辨力的混淆与错误问题,并且该文是引用了国标 GB12338—90、GB20815—2006 中对分辨力定义的错误。虽然,我曾发表“论成像系统易混淆的分辨率与分辨力”一文与 2012 年 1 月在电子工业出版社出版的《安防视频监控实用技术》(本书深受读者欢迎,已增印了 5 次)第 1.3 节中列出了 105 条安防技术基本知识概念混淆不清与错误的问题来予以纠正,有熟识的专家经我指出后,在后面的文章中就有改正,但还未引起安防界有关部门及权威人士的重视,现又增加了 45 条到 150 条。因此,本节再次论述一下安防监控技术的学科性质及由此产生的 150 条安防技术基本知识概念混淆不清与错误的问题,期望引起安防有关部门及权威人士的重视与纠正。

1.4.1 安防监控技术的学科性质

1. 安防监控技术是现代技术综合应用的科学技术

众所周知,一直以来,安全防范技术涉及的学科领域多、范围广,过去一直是将光电、电子、计算机等学科技术和设备拿来构成安全防范系统,因此它是光电等学科技术的一门应用技术。尤其是光电信息技术学科,如安全防范系统的前端的图像传感器、防盗、防火探测器主要是 CCD 和 CMOS 光电成像器件,以及各种光电与热电探测器件(现进一步发展到各种光纤传感器),其终端的记录与显示是光电存储器和各种电光转换器件与发光器件构成的显示设备,以及可见与不可见光照明光源,还有传输图像信息用的光纤、红外光传输,夜视,以及光电图像的视频处理、识别与跟踪系统等,都是光电信息技术中的内容,所以,安防技术实质上主要是光电信息技术在安全技术防范系统中的一门应用科学技术。当然,安防系统的控制部分,要用到计算机技术,电路部分要用到电子技术,设备的装配、定位与机壳的设计制备又牵涉到机

械技术等。因此,安防技术可以说是,一个集光电、电子、计算机、通信、机械等为一体的多学科的边缘和多学科交叉的综合性应用的高新技术。广义地说,安防监控技术是现代技术综合应用的科学技术;狭义地说,安防监控技术是光电信息技术的应用科学技术。

目前,传统的学科界限和专业界限变得越来越淡化,各种高新技术的交叉渗透和融合,将是一门新技术如安防监控技术未来发展的总趋势。因此,安防监控系统的设计者,要密切注意各领域科学技术的发展,要不断采用先进而成熟的技术,不断充实智能化功能,以完善系统的设计。值得指出的是,在综合应用各种新技术的同时,必须要注意探测、响应、延迟三个基本要素的协调;技防、物防、人防三种基本手段的配合,这样才能真正有效地达到安全防范的目的。

随着光电信息技术、微电子、微计算机及数字视频技术的发展,安防监控技术已由传统的模拟式而走向高度集成的小型化、数字化、网络化,并正向着集成化、高清化、智能化的方向发展。目前,安防监控技术已从前台管理走向后台处理。在许多数字视频设备中,将具有图像特征提取、处理与识别的功能,如通过图像分析实现运动探测和报警、人与车辆等的异常行为的探测与报警等,使安防技术具备智能化。目前,安防技术已从应用各学科技术的经典模式向以图像处理、识别与跟踪为核心的安防技术本身特点所需的现代智能化模式的转变。因此,也可以说,安全防范技术学科已由光电等其他学科的应用技术,发展成为一专门的学科技术。下面就论述一下这一学科的发展与形成。

2. 安全防范技术学科的发展与形成

大家知道,一个完整的安防监控系统应具有以下三个最基本的要素。

(1) 入侵探测。即能及时发现防范区域内的各种异常现象。安防系统探测的对象主要是人及其行为。非法的行为我们称为入侵,所以安防系统的探测又称为入侵探测。实现探测的设备为报警(探测)器,红外探测和微波探测是最常用的探测技术。早期探测器设计得很简单,如被动红外探测器,与门控用和节水用的红外传感器没有什么差别,因此、误报警率很高。其他一些报警器也是如此,所以误报警率高,成了困扰早期安防系统的一大难题。

(2) 视频监控。安防系统要能对探测的结果做出评价(判断其真伪),要能控制事件发生的过程,了解事件处置的结果,必须具备监控的手段。在早期安防系统中用声音来进行监控较多,成本也比较低廉。随着电视技术的成熟和普及,视频图像监控成了主要的手段。由于图像信息量大、实时性好,并具有主动探测的能力,逐渐成了安防系统的核心技术,因而在安防系统中占有很大的比重。现在只要有安防,就必有视频监控,这已成了定式。

(3) 周界管理和出入控制。周(边)界是安防系统需要明确的防范区域,即通过各种物理的、技术的手段,组成一个封闭的周界,并通过与周界结合的出入口,对人、物的出入进行管理和控制。安防系统应保证合法出入防范区域的人和物的通畅,有效发现和阻止非法的出入。显然,门禁是适合出入控制的常用设备。高强度的门,配高安全的(防盗)锁是最古老的门禁设备,采用电子或光电技术的方法控制、采用特征识别技术的系统是现代门禁的典型方式,但两者的构成要素是相同的。

当安全表现为一种明显的社会需求,采用拿来主义,借鉴和应有相关的技术,很快实现安全的基本要素,满足社会的安全需求是自然的事,是必然的过程。但是这种方式一定会陆续发现一些严重的问题和不足。就像上面提到的误报警率高的问题。于是,人们开始改造这些拿来的技术,形成安防技术的研究方向,从而开始出现安防特有的技术和产品。这就是安防技术发生、发展的轨迹。下面我们做一简单的归纳和总结。



一项技术（产品）被用于安全的目的，由此产生了功能、结构，以及系统运行管理上的特点，这些特点是由安全目标的特殊性、安防系统探测对象的特殊性所决定，它包括特殊的功能和性能要求、特定的体系结构（应用模式），以及特别的评价标准和方法。为适应这些特点所进行的研究，成为安防技术研究的一个方向，这种一个个的方向，就构成了安防技术的体系，从而产生了安防系统的专用的技术与产品。

视频监控就是一门被用于安全的技术，早期的应用就是实时监视，作为报警系统的复核手段，如同一般工业电视系统。逐渐地，人们开始开发它更多的功能，以满足安全特殊的要求。利用视频监控人在特殊环境下获得图像信息，于是出现了日/夜转换、红外摄像、特殊的防护装置等高灵敏度、适应严酷环境的安防专用摄像设备；而数字视频技术的出现，极大地促进了视频监控在安防系统中的应用，从而产生了专门应用于安防系统的产品和系统，如数字视频记录设备（DVR）、视频网关、远程视频监控系统等。这些产品和应用模式是安防系统所独具的，是为满足安全需求而产生的。随着数字视频应用的深入，实时监控已不能满足安全的需求了，对图像的自动分析、理解、识别，使之具有探测和预警功能，而成为视频监控技术主要的研究方向，也成为拉动安防技术发展的主导技术。因此，虽然可以说安防系统是电视技术的一个重要的应用领域，但也可以说，视频监控（特别是上述的专用技术和产品）已是安防技术的一个重要的或者主要的部分。

其他一些技术也是如此，如红外探测技术是最早应用在安全领域的探测手段，但是安防系统的特殊要求（探测的真实性）促使安防科技人员进行了探测单元结构、信号处理技术上的改进和专业化的设计，使之成为独具特色的入侵探测设备和系统。

一门应用技术的发展，除了要充分利用其他通用技术提供的基础外，注意突出自己的特点是很重要的。凡事预则立，不预则废，突出了特点，就找到了方向，就会有許多课题摆在我们面前。以往，我们比较注意强调安全应用的特点，或强调安全应用目的的重要性，用一种神秘感和特殊性把安防技术隐蔽起来。这样会忽略了去寻找和建立（形成）技术上的特点，从而影响了安防技术自身的发展。

突出安防技术的特点，就是要深层次地理解安全的需求。要探索安全领域潜在的需求，加强应用基础研究，加强前沿学科的研究和探索，实现技术导向，促进安防技术的发展。安防技术是在其他学科的基础上，在通用的技术环境下（技术、平台、芯片等）发展起来的，逐渐地形成了自己的产品和系统，形成了自己的特点和专门的技术方向。在这些方向上开展的基础研究、应用基础研究，将会产生安防所特有的技术、平台、芯片等。这时我们会说，安防技术是一门独立的学科，而这个学科最主要的特点是处于其他学科的边缘和多学科交叉。

随着光电信息技术、微电子、微计算机及数字视频技术的发展，安防技术已由传统的模拟式而走向高度集成的小型化、数字化、网络化，并正向着高清化、智能化发展。并且，已开始从前台管理向后台处理等方面发展。不久，在许多数字视频设备中将具有图像识别和特征提取的功能，如通过图像分析实现运动探测和报警、人与车辆等的异常行为的探测与报警等，使安防技术具备智能化。尤其美国 9·11，以及英国爆炸案等事件的发生，更加促使安全防范技术学科的诞生和发展。目前，安防技术已从应用各学科技术的经典模式向以图像处理、识别与跟踪为核心的安防技术本身特点所需的现代智能化模式的转变。安全防范技术学科已由光电等其他学科的应用技术，发展成为一专门的独立的学科技术。

所谓安防技术，即安全防范（Security Protection, SP）技术的简称，其技术系统经历了由简单到复杂、由分散到组合与集成的发展变化。目前，安全防范技术系统是，集视频监控、入

侵探测与防盗防火报警、出入口目标识别与控制、楼宇对讲与访客查询、保安巡更与治安管理、电子警察与智能交通、实体防护与安检、汽车场管理,以及系统综合的网络化高清化智能化的监控与管理的安防技术体系。因此,安防技术学科实际上主要由视频监控技术、入侵探测与防盗防火报警技术、出入口目标识别与控制技术三大部分组成。至于综合系统后面的几项,均可分别纳入这三大部分之中。如楼宇对讲与访客查询、电子警察与智能交通可纳入视频监控技术;保安巡更与治安管理可纳入入侵探测与防盗防火报警技术;实体防护与安检、汽车场管理可纳入出入口目标识别与控制技术之中等。

3. 安防监控技术的基础是光电信息技术

由上可知,虽然安防技术可以说是,一个集光电、电子、计算机、通信、机械等为一体的多学科的边缘和多学科交叉的综合性应用的高新技术。但是,它实际上主要是光电信息技术学科的应用学科技术。因为你翻开光电信息工程专业的光电信息技术课的教材,其中每一章都与安防监控技术有关,是安防监控设备与系统的核心,是学好安防监控技术的基础(而电子、计算机等专业找不到任何课程是这样)。如果先学好了这一基础课程,再去学安防监控设备与系统,就简单而容易多了;并且也绝对不会出现说:可见光的波长是 $0\sim 720\text{ ns}$ 之间;红外波长是大于 700MM , $0.7\mu\text{M}$;CCD是光耦器件;被动红外探测器用来感光的是CCD;镜头是传感的、轮巡的、监控的……等可笑错误(参见后面的150条)。

大家知道,过去与现在从事安防技术的工作人员,大多是一些学电子技术与计算机技术等专业的,而几乎没有光电信息技术类专业的毕业生。这一方面是电子或计算机专业是老专业,毕业的学生多;而光电信息是边缘学科的新专业,毕业的学生少。另一方面是,各安防公司的老总也未看清安防技术最主要是光电信息技术的应用技术,因而造成安防技术的工作几乎没有光电信息技术类专业的人员。所以,这些人员缺乏光电信息技术的基本理论知识,因而在说话、写文章、甚至未经严格审查的产品说明与出版的书籍等中,都出现这样那样的概念混淆与错误。尤其在安防杂志与网站的技术文章中,因为是各安防公司有相当地位甚至还可能被安上“专家”的技术人员写的文章,其他人员再转抄,加上搞传媒编辑的人员大多是学文科的,而某些杂志又不像一些专业核心期刊那样,把技术文章送真正的专家审核把关,编辑们又看不懂有否技术问题,也只能在文字与格式上做一点修改,就是有错误也照登,所以错误就一犯再犯,使传媒杂志与网站的技术质量不高(一般,凡是期刊的技术稿件,都应请技术专家审核把关)。

由于安防又是一个新的技术门类,尽管与光电、音视频传输、网络、通信等技术有一定的关联性或者说是这些技术的延伸,但又不完全等同于这些技术。由于安防技术还不是一个独立的技术门类,也没有成立技术学会,因而过去始终得不到社会的重视,大专院校或科研机构也没有专门的安防技术专业(现在只有中国人民公安大学、厦门安防科技职业学院、浙江安防职业技术学院与几个警官与政法职业学院有开办,但均未开设光电信息技术基础课)或研究机构,因而安防行业的研发人才多由电子、计算机或通信等行业转行而来,尤其缺乏光电信息技术,因此真正的高层次的研发人才十分匮乏。所以,安防研发队伍的整体水平亟待提高,急需高等院校对口专业培养的一批真正是有光电信息技术基础的安全防范技术学科的专业人才。

作者开始一直是从事光电信息技术的教学与科研的,已编著本科与研究生光电类教材与专著有《光电技术》(第1、2版)、《光电技术实验》、《光纤及其传感技术》、《图像测量技术》、《光电仪器及系统设计》、《光电检测技术》(第1、2版)、《光电检测技术习题与实验》、《光电信息实用技术》、《光电信息技术》等9项11本;现根据有的高校的需要,还计划写本科与研



究生光电类教材,如《视频图像测量技术》、《光电器件及系统》,给职校光电专业大中专班写《光电子器件制作技术》、《光电子器件检测技术》等。

作者自1994年被武汉一安防公司聘为技术顾问开始,到现在从事安防工作已有21年,并深知安防界存在的问题。后来退休带领硕博研究生团队给中山、广州、深圳有关公司研发人民币防伪与安防产品,并被一些安防公司聘为总工、技术总监与技术顾问,被一些安防传媒聘为编辑顾问与技术专家,被多所高校光电院系与重点实验室以及一些安防与商学院聘为兼职教授、客座教授、荣誉教授、合作教授与博士生导师。由于发表文章用理论公式驳斥了安防领域中那些不懂光电基本知识所出现的错误问题,而被一些网站誉为“中国安防行业技术的领军人物”等。在安防技术方面已出版的著作有《安全&光电》、《安防视频监控实用技术》、安防新技术及系统系列精品丛书之一《安防&智能化——视频监控系统智能化实现方案》、丛书之二《安防&物联网——物联网智能安防系统实现方案》、丛书之三《安防&云计算——物联网智能云安防系统实现方案》等5本,还计划写丛书《安防&大数据》、《安防&智慧化》等。

由于深知我国急需安防技术专业人才与这一专业应学的专业理论及技能,现计划帮助一些院校创办真正的有光电信息技术基础的安防技术或安防工程专业,因而正在给高校与职校安防技术专业撰写,光电信息与安防学科-高校与职校适用的安防科学与工程专业教材系列:《安防&光电信息——安防监控技术基础》,下面将接着写《安防视频监控系统实用教程》、《安防视频监控系统设备的使用与维修》、《安防系统工程的设计施工安装调试与维护》、《安防入侵探测报警技术》、《安防目标识别与出入口控制技术》等。有想创办安防专业者,可来邮(lei3833@126.com)联系。

综合本节所述,安防监控技术的学科性质全面而确切地应该是,在光电信息技术基础上的一门多学科交叉的前沿学科的综合性的应用科学技术。

1.4.2 安防监控技术基本知识概念混淆不清与错误的150条问题

由于光电信息技术是安防技术的基础与核心,因而安防技术实际主要是光电信息技术在安全技术防范系统中的一门应用科学技术。但是,从事安防技术的大多是一些电子技术与计算机技术等专业的工作人员,他们不了解光电信息技术的基本理论知识,因而在安防传媒杂志与网站上发表的文章、甚至产品说明书与出版的安防书籍等中,都出现过这样那样的基本知识概念混淆与错误。本节将我接触发现的150条安防技术知识概念混淆与错误的问题,整理成8个专题公示在这里,希望从事安防方面的技术人员、管理人员、传媒人员等可以认真地看一看,看能否找出其中每一条的错误,然后用1.4.3节的知识要点去分析,并带着你的问题去学习本书,相信最后都会找出正确的答案。本人欢迎读者来邮(lei3833@126.com)来电话咨询与讨论。

1. 光的波长范围及其单位方面的概念混淆不清与错误的问题

(1) 可见光的波长是300 nm~700 nm。

(2) 通常人眼识别光线的波长范围在0~720 ns之间,超过720 ns的光线人眼就无法见到,比如红外光等。

(3) 通过IR-CUT白天只允许0~720 ns波长的光线进入,避免了白天的彩色失真。晚上只允许720 ns以上波长的光线进入,全部用红外光,避免720 ns波长的光对红外光的干扰。

(4) 红外光是大于700 nm的光。

(5) 红外光是大于 0.7 μm 的光。

(6) 红外光波长的单位是 μm ，可见光波长的单位是 nm 。

(7) 波长超过 700 nm 的光线叫作红外线，900 nm 以上的红外线基本无红暴，波长越短，红暴越强，红外线感应度也越高。

(8) 715 nm 的红外灯能使大多数黑白摄像机或昼夜转换摄像机对该波长范围的红外光都比较敏感，从而达到对摄像机选择要求不高的效果，并且较于 830 nm 的红外灯具有更远的投射距离，但同时此波长的红外灯也特别容易在灯窗口处产生红暴点，从而使任何人都能够远距离看到红外灯的工作状态。

(9) 红外灯有不同的功率及 715 nm 、830 nm 两种波长，波长的不同决定了红外灯照明距离和效果：715 nm 的红外灯由于其照明距离远，效果好，但是会产生红暴情况（现在家用数码相机补光用的就是这种红外灯）；使用 830 nm 的红外灯基本没有红暴现象或是红暴很少，但在实际应用中应选用低照度摄像机。

(10) 红外感光火灾探测器是利用红外光敏元件的光电导或光伏效应来敏感地探测低温产生的红外辐射的，红外辐射光波波长一般小于 0.76 μm 。

(11) 对于较为苛刻的环境，例如配合激光灯，对远距离目标监控，就要保证非可见光波长在 900 μm 时依然能够达到 60% 以上的透射率。

(12) 红外线可分为三部分，即近红外线，波长为 0.78~2.50 m ；中红外线，波长为 2.50~25 m ；远红外线，波长为 25~1 000 m 。

(13) 一般的摄像机镜头，透过光谱的中心波长在 500~600 MM 之间，……透雾摄像机镜头透过光谱的中心波长必须在 780~900 MM 之间。因此，很多透雾镜头采用了多层镀膜技术，让 500~900 MM 波段的透过率达到 80% 以上……

(14) 可见光部分波长范围是：390~760 nm （毫微米）。大于 760 nm 部分是红外光，小于 390 nm 部分是紫外光。光纤中应用的是：850，1 300，1 550 三种。

(15) 红外线车辆检测器，由红色发光二极管发射的波长为 660 nm ，这种辐射是人眼所不能看见的。

2. 摄像机镜头方面概念混淆不清与错误的问题

(1) 感光的摄像镜头。

(2) 阵列红外夜视一体机 LED-Array IR Night Vision Camera 分体式结构设计，筒形阵列红外光源；1/3" SONY HAD CCD，520 线高解；可选多种感红外中、长广角镜头。

(3) 镜头是传感的、轮巡的、监控的。

(4) 只要选三可变或二可变预置位镜头就可对风景区监控实现预置位。

(5) 对云台、变焦的行控制，预置位和镜头的轮巡。

(6) 没有可见光，普通视频监控镜头就失去了监控功能。

(7) 选好风景区监控镜头，可使红外夜视距离增达 1 km 以上。

3. 成像器件与摄像机方面概念混淆不清与错误的问题

(1) CCD 是光耦器件。

(2) 一般采用 CCD 或 CMOS 两种光电耦合器。

(3) CCD 是使用一种高感光度的半导体材料制成，能把光线转变成电荷，由许多感光单



位组成,通常以百万像素为单位。

(4) 一般,CCD 能感应的感光范围波长为 $300\text{ nm}\sim 1\,200\text{ nm}$ 之间。

(5) CCD 在数据传送时不会失真,因此各个像素的数据可汇聚至边缘再进行放大处理;而 CMOS 工艺的数据在传送距离较长时会产生噪声,因此,必须先放大,再整合各个像素的数据。

(6) 以提升 CMOS 低照度性能而言,业界提出了微透镜(Micro Lens)阵列技术,让更多的光源能导入到 CMOS 传感器的表面(光电二极体)上。

(7) 对于降低 CMOS 图像中的噪声信号,一种是对原有半导体制程进行改进,在 CMOS 电路的硅表面上掺入杂质,以此形成一个针扎层(Pinning Layer),此结构可将光源吸收到硅晶片的内部,进而降低(光电二极体)表面的噪声。

(8) 摄像机就是 CCD。

(9) CCD 摄像机由镜头与 CCD 构成。

(10) 其实摄像机是由信号采集部分(一般采用 CCD 与 CMOS 两种光电耦合器)、信号处理部分(整流、滤波、放大器和 DSP 芯片等)、信号输出部分、电源等组成。

(11) 网络摄像机由感光摄像镜头、传感器、系统指示灯、网络指示灯、网线插口、电源接口以及报警触发等核心装置组成。

(12) 宽动态摄像机市场会面临 DSP 和 DPS 两种传感技术的竞争。

(13) 在摄像机发展的岁月里,从最初的真空管摄像机,发展到现在的 CCD、CMOS、DPS 摄像机。

(14) DPS 摄像机是不同于 CCD 与 CMOS 摄像机的新型摄像机。

(15) 摄像机按图像尺寸不同可分为:

A 类:标清摄像机。

B 类:准高清摄像机。

C 类:高清摄像机(国标:安全防范视频监控摄像机通用技术要求征求意见稿)。

(16) 安全防范系统中,图像的生成当前主要是来自 CCD 摄像机,CCD 是电荷耦合器件(Charge Coupled Deice)的简称,它能够将光线变为电荷并将电荷存储及转移,也可将存储之电荷取出使电压发生变化,因此是理想的摄像机元件,以其构成的 CCD 摄像机具有体积小、重量轻、部受磁场影响、具有抗震东和撞击之特性而被广泛应用。

(17) CCD 尺寸每增大一点,成本就呈几何数增长,因此如果监控要走高清化,CCD 显然发展前景有限。而 CMOS 最大特点在于其成本低、功耗低。在获得相同像素数的情况下,价格更低,具有很高性价比,可以不断朝更高像素、更高分辨率发展,而高清监控对成本是非常敏感的,也因此市面上大部分高清摄像机都采用 CMOS。

(18) 图像传感器是将光信号转换为电信号的装置,在数字电视、可视通信市场中有着广泛的应用。

4. 彩色摄像机日夜转换中的概念混淆不清与错误的问题

(1) CCD 摄像机可感应白光与红外光。

(2) CCD 能接收红外光。

(3) 日夜型彩色摄像机就是用红外滤光片进行切换的。

(4) 摄像机捕捉红外光达到成像目的。

(5) 彩色摄像机晚上全部用红外光。

(6) 摄像机为了获取精确的彩色图像(白平衡),红外滤光功能平时处于打开的状态。当环境照度较低时,通过 ICR(红外滤光)关闭红外滤光器以便在黑白模式下获得更高的光灵敏度。

(7) IR-CUT 技术的应用彻底解决了杂光干扰问题,从原理上简单的说就是通过 IR-CUT 白天只允许 0~720 nm 波长的光线进入,避免了白天的彩色失真。晚上只允许 720 nm 以上波长的光线进入,全部用红外光,避免 720 nm 波长的光对红外光的干扰,于是在白天与夜晚都能取得最佳视觉效果。

(8) 当摄像机具有 ICR(红外滤片移除)功能时,图像转为黑白的同时伴随有滤光片移除的机械运动声,此时,开启红外光源时,显示的图像应变得明亮和清晰。(国标:安全防范视频监控摄像机通用技术要求征求意见稿)。

(9) 摄像机在黑白模式下……为黑白图像;具有 ICR(红外滤片移除)功能时应可感应红外光源。(国标:安全防范视频监控摄像机通用技术要求征求意见稿)。

5. 分辨率与分辨力中的概念混淆不清与错误的问题

(1) 分辨率(分辨力)。

(2) 500(H)×582(V)的黑白低解摄像机,清晰度为 420 线。

(3) 500(H)×582(V)的彩色低解摄像机,清晰度为 420 线。

(4) 752(H)×582(V)的黑白高解摄像机,清晰度是 600 线。

(5) 752(H)×582(V)的彩色高解摄像机,清晰度是 480 线。

(6) 分辨力(清晰度)。

(7) 清晰度是由多层次的综合因素决定的,而分辨率是一个客观的东西。

(8) 采用分辨率高、CCD 高的摄像机。

(9) 分辨率就是人眼能分辨清楚扫描线间的最小距离。

(10) 在测试摄像机“辨析被摄景物细节”能力时,一般会使用到分辨力这一术语。分辨力的单位是“电视行(TVLine)”,也称为线。有时我们也会使用分辨率这个术语。其实分辨率和分辨力是完全等价的,它们只相差一个系数而已。

(11) 水平分辨力被定义为在和垂直方向上相同的尺寸下,水平方向上能分辨出的最高余弦光栅线数。水平分辨率指的是整幅画面在水平方向上(全尺寸)能分辨出的最高余弦光栅线数。在 PAL 制式下,由于宽高比被定义为 4:3,因此只需要把水平分辨率乘以 0.75 即可得到水平分辨力。在垂直方向上,两者是相等的。

(12) 通过有效像素计算分辨力。

(13) 当然在实验室对摄像机进行检验测试,需要具备一定的测试条件,首先一台具备以下条件的彩色监视器(图像分辨率:不小于 1920×1200;图像分辨力:不小于 1000TVL……)。

(14) 某摄像机有效像素为 720×576P,由于孔阑效应(CCD 器件的感光单元具有一定的截面积,当它们感光到图像细节或边缘部分时,会使细节变得模糊,或使轮廓边缘的电平跳变趋于平缓。这一现象也称为孔阑效应)和扫描线有效性导致图像分辨率下降 25%,所以摄像机的实际分辨率为:540×432。如果用分辨力来表示就成为了 405×432。

(15) 在理想情况下,垂直分辨力就等于每帧画面的有效垂直扫描行数。

(16) 一系列在安防行业得到广泛认可的国家标准中对分辨力的定义是这样的:对一帧等宽黑白相间的线条之图像,分辨其黑白线条最小宽度的能力,以常用测试图上鉴别出的每帧高



度中的最大线数来表示（参见国标 GB 12338—90、GB 20815—2006），分辨力的单位是“线（TVL）”。

（17）分辨率是某个器件或设备（如 CCD、CMOS）的理论值，而分辨力则某个视频设备（如摄像机）经过实验室测试后主观评价的结果。所以说分辨率是选择摄像机时的参考值，而分辨力则是表示摄像机真正的辨识能力，有价值的。

（18）仅以摄像机所采用感光芯片的分辨率来评价该摄像机主要性能显然不是很科学严谨的。因此在实验室环境下对摄像机进行测试后，所得出的分辨力指标的实际测量值往往显得更为客观真实，更有说服力。

（19）水平分辨率（TVLine）= $2 \times \text{亮度信号带宽} / \text{行频} \times \text{行正程时间} / \text{行周期}$ ；注意到：行频*行周期=1，所以我们可以得到：水平分辨率（TVLine）= $2 \times \text{亮度信号带宽} \times \text{行正程时间}$ 。

（20）用目视法观察监视器或显示器上图像中心楔上能分辨的最大线数，所得结论即为该款摄像机的分辨力指标（单位为 TVL）。

（21）分辨率的单位是“像素点数 Pixels”，而不是“电视线 TVLine”。

（22）分辨力定义：在测试摄像机“辨析被摄景物细节”的能力时，一般会使用到分辨力这一术语。一系列在安防行业得到广泛认可的国家标准中对分辨力的定义是这样的：对一帧等宽黑白相间的线条之图像，分辨其黑白线条最小宽度的能力，以常用测试图上鉴别出的每帧高度中的最大线数来表示（参见国标 GB 12338—90、GB 20815—2006），分辨力的单位是“线（TVL）”。而分辨力在水平和垂直两个方向上又分为水平分辨率和垂直分辨率。（摘自：安防知识网 2010-12-27 什么是安防摄像机分辨力？）

（23）分辨率的定义：分辨率的概念是：有效区域内水平和垂直方向上的像素数（参见国标 GB18910.1）。分辨力、分辨率二者既相互关联又各有所指，分辨率是某个器件或设备（如 CCD、CMOS）的理论值，而分辨力则某个视频设备（如摄像机）经过实验室测试后主观评价的结果。所以说分辨率是选择摄像机时的参考值，而分辨力则是表示摄像机真正的辨识能力，有价值的。（摘自：安防知识网 2010-12-27 什么是安防摄像机分辨率？）

（24）图像分辨率：不小于 1920 x 1200；图像分辨力：不小于 1000TVL。（摘自国标：通用型应用高清电视摄像机测量方法征求意见稿）

（25）水平分辨率：在图像高度相等的水平尺寸内可分辨的垂直黑白条数（TV 线）。

垂直分辨率：图像高度范围内可分辨的水平黑白条数。

（摘自国标：安全防范视频监控摄像机通用技术要求征求意见稿）

（26）按图像尺寸类别，摄像机的中心分辨力应满足：

A 类：水平分辨率 ≥ 400 线，垂直分辨率 ≥ 380 线。

B 类：水平分辨率 ≥ 600 线，垂直分辨率 ≥ 600 线。

C 类：水平分辨率 ≥ 800 线，垂直分辨率 ≥ 800 线。

（摘自国标：安全防范视频监控摄像机通用技术要求征求意见稿）

（27）有效图元（像素）：对 CCD 和 CMOS 摄像机来说，有效图元和清晰度是有直接关系的，一般而言它们之间是线性关系。以黑白摄像机为例，像素为 752×582（CCIR），水平清晰度达 570TVL；像素若为 795×596，水平清晰度一般可达 580TVL。而摄像机的电路有一定提升和降低作用。

（28）由于衍射像有一定的大小，我们把两个衍射像间所能分辨的最小间隔称为理想光学系统的分辨率。

根据实验证明, 两个像点间能够分辨的最短距离约等于中央亮斑的半径 R , 即

$$R = \frac{0.61\lambda}{n' \sin U'_{\max}}$$

该式即为理想光学系统的衍射分辨率公式。(摘自某安防书)

6. 主/被动红外探测器中的概念混淆不清与错误的问题

(1) 主动式红外探测器性能上要求发射机的红外辐射光谱应在可见光光谱之外。

(2) 主动式红外探测器是发射机与接收机之间的红外辐射光束, 部分被遮断而产生报警状态的探测装置。

(3) 主动式与被动式红外探测器都要有抑制白光的能力。

(4) 被动式红外探测器要有抑制白光能力。

(5) LED 阵列也属主动式, 红外激光也是主动式。

(6) LED 与 LD 的电源只要稳压就行。

(7) LED 对电压非常敏感, 电压稍高 LED 管芯就会烧掉; 而电压略低则发光量又会大大降低。最好匹配高质量的开关电源, 交流输入电压最好从 170 伏到 270 伏电压都能做到较好的稳压, 以适合恶劣的供电环境。

(8) 被动式红外探测器正对玻璃门窗会有两个问题: 一是白光干扰, 虽然被动式红外探测器 (PIR) 对白光具有很强的抑制功能, 但毕竟不是 100% 的抑制, 不要正对玻璃门窗, 可以避免强光的干扰; 二是避免门窗外复杂的环境干扰, 比如太阳直射、人群、流动车辆等。

(9) 入侵者在实施入侵时, 破坏原有温度场发出红外光。

(10) 热释电红外传感器它能将波长为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 之间的红外信号变化转变为电信号。

(11) 菲涅尔透镜将目标区域纵横划分多个敏感区与非敏感区。物体在连续运动时, 会断续透过透镜聚焦在 CCD 上, CCD 产生脉冲感应电流。

(12) 被动红外探测器用来感光的是 CCD。

(13) 微波、红外、微处理器三鉴入侵探测器。

(14) 由于移动探测器通常基于探测入侵者辐射热量的被动红外线技术, 往往只要遮盖住探测器就能轻易骗过。

(15) 热开释红外火焰检测器, 直接检测火焰中波长为 $4.35 \pm 0.15 \mu\text{m}$ 的红外光谱, 检测目标比较明确, 它由热开释探头和放大器组成, 不足之处是: 这种类型的传感用具有压电性, 对声音电磁波以及震惊都十分敏感, 所以使用的地方受到一定的限制, 它的检测间隔小于 80 m。

(16) 被动式红外探测器是通过红外热释传感器对相应区域的红外能量变化来判断该区域内是否有人。由于人体的红外能量与环境有差别, 当人通过探测区域时, 探测器感应到红外能量的变化, 就会向系统提供反馈信号, 配合智能家居的联动功能, 可以实现人来灯亮、人走灯灭的功能。

7. 一些基本概念提法顺序的概念混淆不清与错误的问题

(1) 视频监控要向智能化、数字化、网络化发展。

(2) 网络化、数字化、智能化是我们的方向。

(3) 数字化是监控系统的未来之路 (2011 年 9 月 15 日演讲)。

(4) 目前 (2012 年 11 月文), 监控的网络化已经成为安防行业发展的趋势。



(5) 现在, 视频监控系统必须向数字化、网络化、智能化、高清化发展。

(6) 说到底, 我们的安防监控要实现数字化、网络化、智能化、集成化、高清化。

(7) 由于第三代数字化监控系统存在诸多不可比拟的优点, 符合信息化、智能化、网络化的发展方向。

(8) 随着技术的进步, 应用场景的不断深化, 平安城市应用将会向智能化、高清化方向发展。

(9) 随着消费链末端的大众安全消费水平提高, 也带动各专业领域对安全方面的需求; 数字化、网络化、智能化、集成化、民用化技术的提高, 更促进了安防产品的升级换代。

(10) 安全防范技术也是在随着科学技术的发展不断的向前发展, 就像通信自动化技术的发展一样, 数字化、网络化、智能化、集成化、规范化将是安全防范技术的发展方向。

(11) 高清已经成为当今视频监控的发展主流, 随之而来的是监控系统从模拟向网络化的转变。

(12) 视频监控系统的智能化、网络化、集成化是必然的趋势。

(13) 顺应视频监控行业的发展趋势, 高清高速球也朝着高清化、智能化、网络化的方向发展。

(14) 物联网概念的发展将使得视频监控朝着智能化、数字化、信息化的方向迈进。

(15) 安防产品数字化、智能化、高清化和网络化是一个不可逆转的潮流。

(16) 智能视频监控高清化、智能化、网络化、数字化(文章的标题)。

(17) 智能化技术随着安防行业的发展飞速猛进, 目前, 在前端设备已经实现智能化、高清化、数字化的基础上, 后端存储的智能化需求也进一步提高。

(18) 在核心技术的应用上, 云存储加速安防高清化、智能化、网络化发展趋势。

(19) 监控信息的识别、提取、检测。

(20) 车牌自动识别技术是指能够检测到受监控路面的车辆并自动提取、识别车辆车牌信息(含汉字字符、英文字母、阿拉伯数字及号牌颜色)进行处理的技术。它以计算机技术、图像处理技术、模糊识别为基础。

(21) 物联网是通过射频识别(RFID)、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备, 约定的协议, 把任何物品与互联网连接起来, 进行信息交换和通信, 以实现智能化识别、定位、跟踪、探测、监控和管理的一种网络。

(22) 对视频帧与基准背景图像进行比较, 相同位置的像素(区域)变化则认为是变化了的区域, 对这些区域进一步处理、跟踪、识别, 得到包括目标位置、尺寸、形状、速度、停留时间等基本形态信息和动态信息。

(23) 高清监控将会面临包括传输、压缩、存储、网络、性价比、照度要求、可靠性、应用环境条件、与标清的可融合性等多方面的压力与挑战。

(24) 视频图像识别分析软件简析(某安防书内小标题)。

(25) 视频目标识别和检测(某安防书内小标题)。

8. 高清及尺寸表示等方面概念混淆不清与错误的问题

(1) 某摄像机产品的尺寸为 100*50*19 mm。

(2) 1080P 高清网络摄像机。它采用高性能多媒体处理器, 支持 1920*1080。

(3) 同样, 高清摄像机的水平分辨率=2*行正程时间*视频通道带宽。

(4) 通常, 1W 大功率 LED 的典型工作电流为 350mA, 如果选择 RFB 等于 1 欧姆, 则 RFB 的功耗为: $PRFB=I^2*R=0.352^2*1=0.12W$ 。

(5) 宽高比为 16: 9 的网络摄像机, 对应分辨率为 1920X1080, 宽高比为 4: 3 的网络摄像机, 对应分辨率为 1600X1200。

(6) 百万像素以上就是高清。

(7) 有百万像素以上的高清网络摄像机就是高清。

(8) 能不在外界触发情况下连续输出通用视频图像的装置为高清摄像机。

(9) 在前端模拟摄像机接入 DVR 的条件下, D1 就是高清。

(10) 高清网络摄像机的分辨率最低是 720p, 它是 CIF 分辨率的 9 倍, 另外 1080i/1080p 的分辨率是 CIF 分辨率的 20 倍, 在同样的显示条件下, 高清会清晰得多。

(11) 智能视频监控系统 (Intelligent Video Surveillance, IVS) 是个宽泛的称呼, 其实, 所有与芯片技术、软件技术、存储检索、计算机技术相关的视频监控技术都可以称为智能视频监控技术。

(12) 亮度可达到 700cd/m² 以上。

(13) 这种纳米管的延迟时间小于 1ps, 传输调制比率高达 10⁻⁴。

(14) 10⁻⁹m 是纳米, 10⁻¹² m=1 pm。

(15) Y Media 公司开发的 C3D (CMOS Color Captive Device) 是新一代半导体成像技术, 它不仅提高了像素设计技术, 也改进了生产工艺。

(16) I²C (Inter-Integrated Circuit) 总线是一种由 PHILIPS 公司开发的两线式串行总线, 用于连接微控制器及其外围设备。

(17) I²S (Inter-IC Sound) 总线是飞利浦公司为数字音频设备之间的音频数据传输而制定的一种总线标准。

(18) 应用实践已经证明, GPS 相对定位精度在 50 KM 以内可达 10⁻⁶, 100~500 KM 可达 10⁻⁷, 1 000 KM 可达 10⁻⁹。

(19) 户外 LED 显示屏的亮度大于 80 00 mcd/m², 是目前唯一能够在户外全天候使用的大型显示终端; 户内 LED 显示屏的亮度大于 2 000 md/m²。

(20) 感知层由以 RFID、WSN、GPS、红外感应器、激光扫描器、光热敏器件等关键技术为代表的物联网信息传感设备组成。

(21) 物联网时代的安防行业具有从“智慧安防”到“集约安防”转变之特征。

(22) 智慧城市的概念非常简单, 即一种高于数字化城市、智能化城市, 让市民依托信息化基础建设的完善, 充分享受城市信息化带来的智慧化城市生活。这是广义的智慧城市定义。

(23) 视频编码器, 简称 DVS。

(24) WLAN 传输必须以视矩方式, 无非视矩能力。

(25) 视频安防监控系统。

(26) 目前, 安防产业得到初步应用的技术, 包括视频、智能、GPS、传感等, 都是物联网产业的核心技术。

(27) wimax 技术的物理层和媒质访问控制层 (mac) 技术基于 ieee 802. 16 标准, 可以在 5.86 hz、3.56hz 和 2.56 hz 这三个频段上运行。wimax 利用无线发射塔或天线, 能提供面向互联网的高速连接。其接入速率最高达 75 mb/s, 胜过有线 dsl 技术。

(28) Wahlberg 认为 4g 移动技术的全球数据传输速度会达到 100 m, 而在局部地区的速度



可以达到 1g。在一个较短的距离内达到 100 m 每秒的速度并不是一件难事。

(29) 从悉尼到斯德哥尔摩,手机可以以 100m 的带宽进行通讯,这就是 4g 技术。

(30) 什么是云计算呢?我们讲他是 SAS, PSA 和 IAS,技术设施是服务到平台就是服务,到软件就是服务,最终还是由云消费者。(某公司付总在中国信息产业经济年会上的报告)

(31) 安全防范系统是以维护社会公共安全为目的,运用安全防范产品和其他相关产品所构成的入侵报警系统、视频安防监控系统、出入口控制系统、防爆安全检查系统等,或由这些系统为子系统组合或集成的电子系统或网络系统。

(32) 视频编码器(Digital Video Server, DVS)是网络视频监控时代的标志性产品之一,DVS 的出现,标志着视频监控系统进入了网络时代。编码器的主要功能是编码压缩和网络传输。

1.4.3 识别安防技术知识概念混淆与错误需掌握的基本知识点

上述的问题大多是光电信息技术中的基本知识,在本书中也大都能找到正确的解答。下面将安防技术 8 个方面概念混淆不清与错误问题需掌握的基本知识要点做一简介,读者看后即可分析到问题错在那里。要深层地了解其原因,从本书中大多能找到,但最好能参阅本人编著的由电子工业出版社 2011 年 1 月出版的《光电信息技术》,本人准备发表在安防期刊与网上的“应搞清安防技术概念混淆不清与错误的问题”8 个方面的 8 篇专题文章,将会有详细的分析与解答。

1. 有关光的波长范围及其单位方面需掌握的基本知识要点

(1) 要记住可见光的波长范围是 380~780 nm,从而可知小于 380 nm 的光是紫外,大于 780 nm 的光是红外。

(2) 光的波长单位是微米(μm)或纳米(nm),而 $1\mu\text{m}=1\,000\text{ nm}$ 。

只要记住了上述二点,就能鉴别出第 1 个专题中的问题及类似的错误。

值得特别要强调的是,用 nM 与 um 表示波长单位肯定不对,因为单位制中没有这个单位,米的单位是 m 而不是 M,因为字母的大小写代表了不同的含义,如 M 代表兆,一个 M 代表了 10^6 ;还有很多年轻人爱把 um 当作 μm 用,一个 μ 代表了 10^{-6} ,如 $1\mu\text{m}$ 为 10^{-6} m , $1\mu\text{s}$ 为 10^{-6} s 等。u 能代表它吗?实际是有人在打字时,懒得从符号中找 μ ,随便找个 u 来代替而已,这样害得后面不爱动脑的人也跟着引用。这说明不按科学态度办事是害人的,也说明做什么事光爱照搬照抄也是不行的。

2. 有关摄像机镜头方面需掌握的基本知识要点

(1) 摄像机镜头是由光学零件组成的,其作用是将光学图像集聚在后焦面即 CCD 与 CMOS 成像器件的感光面上,它本身不能感光、传感与监控,只有同摄像机组合在一起才可以。

(2) 光学镜头本身不能轮巡,本身只能变焦变倍,只有云台带动镜头与摄像机转动才能轮巡,而云台转动到所需位置才能有预置位。

(3) 要使红外夜视距离增达 1 km 以上,除摄像机选用长焦镜头外,还需要使 1 km 以上的场景有红外灯能照到,摄像机通过镜头捕捉到物体的反射光才行。

只有真正懂得了上述知识,也就能鉴别出第 2 个专题中的问题及类似的错误。

3. 有关成像器件与摄像机方面需掌握的基本知识要点

(1) CCD 与 CMOS 都是固体成像器件, 尤其 CCD 是电荷耦合器件, 只有它们才是传感的、感光的, 而其他部分都不是, 因为它们都是由能够传感感光的光电二极管阵列组成的。

(2) CCD 与 CMOS 固体成像器件是摄像机的一个核心部分, 但它们不是摄像机。因为黑白摄像机是由 CCD 或 CMOS 成像器件、扫描驱动及时钟同步、信号处理与放大、镜头、电源 5 大部分组成的。

(3) 安防用单片式 CCD 彩色摄像机是在黑白摄像机基础上增加彩色滤波器阵列、红外截止滤光片与彩色信号的处理电路等构成。

(4) 网络摄像机除有摄像机的基本部分外, 至少要增加视频编码压缩处理与网络的连接装置如视频服务器等, 才能将信号送入网络传输。

(5) 一般, CCD 与 CMOS 都是硅半导体, 而硅的波长响应范围是 $400 \sim 1\,100\text{ nm}$, 因此它们只能对可见光与近红外光响应。

(6) CCD 各个像素的数据是逐点传输到输出端再进行放大处理的, 而 CMOS 成像器件是每个像素都有放大器, 但每个放大器放大效果保持均衡很困难, 因而最后整合会产生噪声。

(7) DPS 摄像机就是第 3 代 CMOS 摄像机, 而唯有 CMOS 成像器件才能在每一像素里集成 A/D 等, CCD 等其他成像器件就不行。

(8) 高清摄像机使用 CMOS 摄像机最主要的原因是其速度比 CCD 摄像机快, 因为它在采集光电图像信号的同时就可直接从 CMOS 晶体管开关阵列中取出电信号, 并能同时处理各单元的图像信息, 所以其运行速度比 CCD 成像器件快得多。

因此, 只要掌握了上述 8 点知识, 就能鉴别出第 3 个专题中的问题及类似的错误。

4. 有关彩色摄像机日夜转换方面需掌握的基本知识要点

(1) 一般硅 CCD 的感应波长是 $400 \sim 1\,100\text{ nm}$, 因此 CCD 摄像机仅能感应可见光与近红外光。

(2) 日夜型彩色摄像机是用红外截止滤光片进行切换的, 即白天要加红外截止滤光片, 夜晚将红外截止滤光片切换开。

(3) 红外光仅是一个载体, 只有红外光线载上物体才有这个物体像, 即摄像机只有捕捉物体反射的红外光才载有物体的信息, 才有这个物体的像。

只有懂得了上述 3 点基本知识, 就能鉴别出第 4 个专题中的问题及类似的错误。

5. 有关摄像机中最易混淆的分辨率与分辨力方面需掌握的基本知识要点

(1) 所有的成像系统对物像细节的分辨能力, 可以用分辨力表示, 也可用分辨率表示, 它们都是一样用人眼衡量成像系统优劣的一个重要的参数, 没有谁好谁差之分。但两者互为倒数关系, 绝不能混为一谈。

(2) 分辨力的定义是, 人眼刚好能分辨的最细两条线之间的最小间隔, 其单位为米 (m) 制, 即 mm、 μm 或 nm。

(3) 分辨率的定义是, 人眼刚好能分辨的最细黑白条纹对数 (单位为线对/mm) 或每帧高电视行数 (单位为 TVL)。为避免乱写, 目前多用摄像机中成像器件 CCD 或 CMOS 的像素数, 如 752×582 等。一般, 摄像机的分辨率多以水平清晰度或解析度表示, 即在电视标准 PAL 制



式下用水平像素数乘以 $3/4$ (即 0.75) 为黑白摄像机的 TVL 线数, 彩色摄像机的 TVL 数, 则在黑白摄像机的 TVL 数基础上再乘以 0.825 即可。

只有明白了上述 3 点基本知识, 就能鉴别出第 5 个专题中的问题及类似的错误。

6. 有关主/被动红外探测器方面需掌握的基本知识要点

(1) 主动式红外探测器是由能发射近红外光的发光器件与能接收近红外光的硅光电探测器器件组成。但硅对可见光也能响应, 因而主动式红外探测器要防止可见光的干扰。

(2) 被动式红外探测器的核心器件是热释电探测器, 它的输出电压与温度的变化率成正比, 因此它是一个交流器件, 即只对变化的温度有响应。由于人体本身辐射 $9\sim 10\ \mu\text{m}$ 的红外光, 因而一般在芯片表面贴有 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 的滤光片, 所以只有移动人体才有输出信号而报警。因此, 它主要是防止有辐射 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波长范围的温度与热量有变化的干扰才行。

(3) 发光器件 LED 与 LD 的亮度与所加电源的电流成正比, 为保持其亮度稳定不变, 必须加稳流电源使电流不变。

只有明白了上述 3 点基本知识, 就能鉴别出第 6 个专题中的问题及类似的错误。

7. 有关一些基本概念提法顺序方面需掌握的基本知识要点

(1) 数字化、网络化、智能化这三化是互相有联系与制约的, 没有数字化就不能真正称作网络化, 因此数字化是网络化的基础。即数字化是安防事业向前发展的根本, 是网络化、集成化、高清化、智能化的基础和核心。

(2) 智能化是网络化发展的高级阶段, 只有智能化才是我们的最终目标! 随便你加上什么化, 都不能放在智能化的后边。如高清化也是为智能化服务的, 因为安防监控最终要实现智能化, 变被动为主动, 这是我们安防人员努力的方向。

(3) 一般, 只有先检测到所需监控的信息, 再提取出特征, 才能进行处理与识别。因此, 检测信息的顺序应该是探测 (或传感或采集变换)、编码、传输、处理、识别、定位、跟踪。

只有明白了上述 3 点基本知识, 就能鉴别出第 7 个专题中的问题及类似的错误。

8. 有关高清监控与尺寸表示等方面需掌握的基本知识要点

(1) 高清是一个行业标准, 必须达到美国 SMPTE 制定的 HDTV 标准。根据该标准, 目前真正符合高清视频的格式主要有 720P、1080i、1080P 三种。并且, 该标准还详细定义了每一种分辨率所对应的帧率等数据, 如具有 16:9 的显示模式和全帧速等。

(2) 真正的高清不是局部高清, 只有在包含了前端摄像机、传输、管理平台、存储、浏览、显示等各个环节时才是。

(3) 表示产品尺寸应该用乘法符号 “ \times ”, 不能用其他符号 (如 * 号、x 字母等), 如某摄像机产品的尺寸应写为 $100\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 19\text{ mm}$ 。

(4) 该写指数处的数字或符号, 在计算机上还应点一下 x^2 放指数处, 不要并行地乱放。

(5) 智能视频监控技术, 是使用了智能视频分析与识别的技术, 即有智能软件算法而具有真正实用的智能化功能的一种技术。

只有明白了上述 5 点基本知识, 就能鉴别出第 8 个专题中的问题及类似的错误。

最后, 还需特别强调指出如下两点。

(1) 对一些度量单位、尺寸与指数项等不能随意乱写, 因为你写的东西是给别人看的, 不

是你自己知道就行的。如长度的单位是米(m)，绝不能写成时间单位的秒(s)；而微的字母表示是 μ ，绝不是u；尺寸的长宽高之间是用乘法 \times 符号（相乘得出体积），而不是用*号、x字母符号；指数项不在指数位置，就可能使意思变了，如 C^3D 写成C3D，就成了C的三维了等。这都是年轻人最易犯的错误，也是现在文风不正的结果。

(2) 对中文“的”、“地”、“得”三字的用法，不是都用一个“的”字代替得了的。这在小学语文课就已解决了的，为什么我们长大了就忘记了呢？这三个字的用法在中文中是很讲究的，即“的”字是放在名词前，“地”字是放在动词前，“得”字是放在动词后。但现在年轻人中，根本没有区分，大多都用“的”字。对于学生中写的作业与文章中的这种错误，在我们老一辈的高校教师都会给予纠正，而现在一些硕、博士毕业的年轻高校教师，往往不太重视而助长了此文风。因为我参与评阅的一些硕、博士的论文中，也往往发现了类似的错误；还有我审阅一些杂志学文科的编辑们审核过的文章中，也有这三个字用法的错误。因此，这种文风也必须坚决地纠正。

1.5 现代安防监控技术的发展方向

所谓安防技术，即安全防范（Security Protection, SP）技术的简称，其技术系统经历了由简单到复杂、由分散到组合与集成的发展变化。它从早期的单一的电子防盗报警系统，发展到与视频监控联动报警系统，到与视频监控、出入口控制、联网报警的综合防范系统，直到现在社区管理以至平安城市的集视频监控、入侵探测与防盗防火报警、出入口目标识别与控制、楼宇对讲与访客查询、保安巡更与治安管理、电子警察与智能交通、实体防护与安检、汽车场管理，以及系统综合的网络化智能化的监控与管理的安防技术体系等。

1.5.1 安防监控技术的演进与发展

安防视频监控技术的发展，已经历了开始的模拟式，到数字化、网络化、智能化方向的发展，即从第一代的全模拟系统，第二代的部分数字化与全数字化的系统，到第三代的网络化、集成化的系统，正在向着集成化、高清化、智能化，即第四代的智能化的网络视频监控系统的方向发展演变。在我国，模拟式系统已经历了数十年的时间，数字化过程只有近十多年时间，而网络化过程只有5年多的时间，但这5年多时间里图像压缩标准、用于图像压缩的DSP处理器性能、视频处理的产品均得到快速地发展。尤其是IT技术及其企业不断进入到安防行业后，安防监控技术和产品的日新月异已可以和IT行业相媲美了。

如果说智能安防技术是安防吸收新技术发展的第一阶段（可参见安防新技术及系统系列精品丛书之一《安防&智能化——视频监控系统智能化实现方案》），物联网智能安防技术是新技术发展的第二阶段（可参见安防新技术及系统系列精品丛书之二《安防&物联网——物联网智能安防系统实现方案》），则物联网智能云安防技术就是新技术发展的第三阶段（可参见安防新技术及系统系列精品丛书之三《安防&云计算——物联网智能云安防系统实现方案》）。显然，物联网智能安防化是第五阶段，物联网智能云安防化就是第六阶段了。这种安防监控技术的发展演进如图1-27所示。

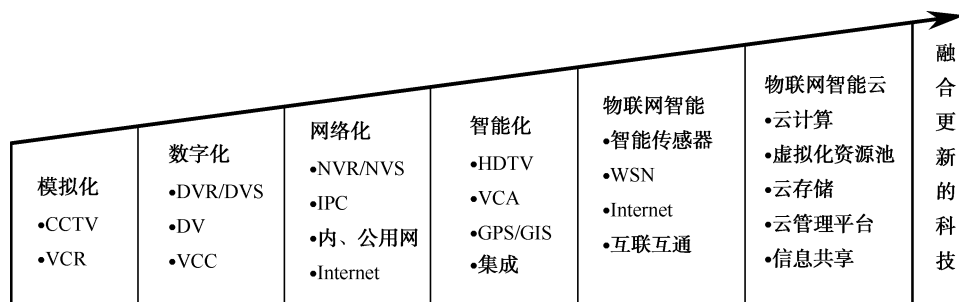


图 1-27 安防监控技术的演进与发展

由图 1-27 可知，安防监控技术还将会朝着吸收融合更新的、更尖端的新兴科学技术的方向发展。显然，这第六阶段，将是目前安防监控技术发展到现在更加完善、更加智能化的崭新的阶段。

因为物联网作为一种技术和理念，也是一种应用和发展的模式。它通过云计算中心，按约定的协议将物体与互联网连接起来，以进行信息交换和通信等。物联网将可能实现人与物体之间的“对话”、物体和物体之间的“交流”，使得生活中的任何物品都可以变得“有感觉、有思想”。物联网的应用同时将为优化资源配置、加强科学管理、缓解资源能源约束提供可能与拓宽渠道。

由于云计算是一种通过 Internet 以服务的方式提供动态可伸缩的虚拟化的资源的分布式并行计算的计算模式，它对信息技术的处理更加便捷，它使得信息更加快速地配备，而且真实有效。云计算在现实生活中的实际应用已经潜移默化地改变着我们的生活，使人们对快速服务的需求越来越能得到满足，它是现代化背景下高服务要求的有力保证。作为网络信息时代下的产物，云计算成为一种新兴的计算模式，它将物联网与互联网进行了有效的融合，对现代社会发展意义重大，因而物联网智能安防技术必将要采用云计算技术来解决海量数据的管理、检索、挖掘等诸多新课题。

物联网智能安防技术必将融合云计算技术，这是其发展的必然趋势。而事实上，物联网智能安防技术也早已融合与包含了云计算技术，只不过在这里明确了其存在系统中的重要性，从而使物联网智能安防技术也顺理成章地发展而成为物联网智能云安防技术。显然，物联网智能云安防技术，是由智能安防技术与物联网技术、云计算技术融合而成的，其结果自然是使安防技术更加真正智能化了。

随着光电等高新科学技术的不断进步和更新，所有的前沿新技术迟早都会被移植或应用到全方位立体化的物联网智能云安全防范大系统中，传统的学科界限和专业界限将越来越淡化，各种高新技术的交叉渗透和融合将是物联网智能云安防监控技术未来发展的总趋势。因此，物联网智能云安防监控技术的发展，还将会不断吸收新理论、新技术。

1.5.2 安防监控技术必须向智能化方向发展

1. 智能化是安防监控系统最终的目标

大家知道，在模拟时代，大部分视频监控系统产品只能“监”，不能“控”。随着网络传输技术、图像编/解码技术的成熟，实现各行业客户的需求已经取得了重大的突破，大型的网络

安防监控系统正在全国各地迅速地建设起来。尤其平安城市建设项目,不仅需要满足治安管理、城市管理、交通管理、应急指挥等需求,而且还要兼顾灾难事故预警、安全生产监控等多方面对图像监控的需求,同时还要考虑报警、门禁等配套系统的集成以及与广播系统的联动,其对“监”、“控”合一,尤其是“控”提出了非常高的要求。而根据现有的技术建立庞大的网络化安防监控系统,还不是“实时监控系统”,实际上仅是一种事后取证的系统,因为它仅提供事发后的录像数据查询,而根本无法确保平安。并且,这种大型网络安防监控系统,摄像机的数量大,可以得到大量的图像,如果还是用人来观察提取有价值的信息,则效果很差。在这种情况下,智能视频(Intelligent Video, IV)的应用程序由此发展起来。而新的智能视频监控系统利用计算机自动地分析、处理、识别图像,从而发现有用的信息。一旦识别异常后,即可进行预/报警,这就是系统智能化的基本出发点。

智能视频监控系统借助计算机强大的数据处理功能,对视频画面海量数据进行高速分析,将监控者不需要关注的信息过滤掉,仅提供关键信息,并依据设定的规则进行判断和报警。如可获得车牌、面像、步态等的视频图像,并将此信息数字化,然后与数据库中的内容进行交叉比对。此外,还有对人与物的异常行为的检测与识别、车辆拥堵、人群拥挤与人数统计的检测和识别等等。尤其是在前端设备中提供了此类智能功能,便可直接对原始图像数据进行检测、分析和识别,一旦发现异常事件,才向后端平台传输,触发启动录像,并进行预/报警,从而使可能发生的事故被制止,并可适应各种不同的特殊环境和事件强度,以充分减少工作人员的工作量。

因此,智能网络安防监控系统不仅可用于事后搜寻犯罪嫌疑人,而且可以预防与阻止灾难和犯罪事件的发生。这种由目视解释转变为自动解释,是安防监控技术发展的必然。随着反恐形势的不断严峻,智能视频监控系统正越来越多地引起人们的关注,其需求量处于不断上升的过程中。从总体上看,智能视频应用市场正在从“概念验证”阶段向“规模应用”阶段转化,并已经开始形成一个产业。从技术角度来看,智能视频监控将向着适应更为复杂和多变的场景发展,向着分析与识别更多的行为和识别异常事件的方向发展,向着真正“基于场景内容分析”的方向发展,向着更低的成本方向发展。从应用角度来看,当前的智能视频监控还是一种高档次应用,主要应用于一些特定的场合,但随着市场和技术的日趋成熟,智能视频监控必将在各行各业得到大范围的推广,甚至走进千家万户。

智能化技术可以针对各种应用环境的特点开发出不同类型的应用技术,以提升产品的适应力。例如,实时图像识别是对视频图像进行实时处理,以达到不同应用环境的要求;目标类型识别是用于识别目标的类型、位置,进一步可以实现人像与步态匹配、车辆分析(如颜色、车型、车牌);目标自动跟踪技术是通过移动目标的识别,自动控制云台上的摄像机来跟踪目标的移动,监视目标的整个移动过程。这些智能化工作方式,在多种应用环境下都很有价值,尤其是图像分析、移动目标的分析技术通过对视频图像中移动目标的识别,并分析统计目标的类型、流量、运动方向、速度等信息,因而可用于道路交通指挥自动化,以及重要场合的自动检测分析,也可以用于环境监控中的自动化监测报警等。

随着光电信息技术、视频分析技术、多媒体数据库、人工智能技术的发展,智能化视频监控系统能够及时、自动地从原始信息中提取大量有用信息,这些信息可以传输、存储和检索,也可以驱动其他数据、触发其他行为,轻而易举地完成人力很难完成的任务。这种计算机和光电图像技术的结合,使得能对视频图像进行自动检测、分析与识别,从而使视频监控系统具备了智能,并可产生许多新型的应用。

视频分析可以大大提高监控效率,还能从复杂的数据中辨认行为和类型,还可提供操作命



令、数据和信息。未来的视频监控系统在很大程度上取决于智能视频分析系统的成功与否，它有望提供高效低廉的，能有效地监视、警告、预报安全威胁的全面的安防监控系统。

总之，智能化是数字化、网络化、高清化安防监控系统构建新型安全防范及保障系统建设的必由之路，是数字化、网络化、高清化安防监控系统发展的必然趋势。智能视频监控的出现正是这一趋势的直接体现。由上可知，要想真正保护人民生命和财产的安全，即真正保平安，安防监控系统必须要智能化。不论数字化、网络化、集成化、高清化，还是标准化、规范化、民用化、信息化等，谁也不能代替人去自动识别所监视的场景中的人与物异常，因此你搞这种化那种化，但都是为智能化服务，给智能化铺路的。因为智能化实际就是全自动化，对一个仪器设备来说，智能化就是取代人的劳动能自动地去进行工作。显然，要取代人的劳动就不是那种轻而易举地就能达到的，它需要人类艰苦奋斗一生，并一代一代地付出毕生的精力才行。所以，只有智能化，才是安防监控系统最终要达到的目标，因而是安防监控系统最终的发展方向。

2. 物联网与安防智能化的关系

物联网是继计算机、互联网与移动通信之后世界信息产业的第三次浪潮，它将现实的基础设施和信息网络实现了整合。物联网作为互联网和通信网的网络延伸与应用拓展，具有整合感知识别、传输互联和计算处理等功能，是对新一代信息技术的高度集成和综合运用。

众所周知，现代安防系统产品前端主要是传感器技术，中间是网络传输技术，终端是智能处理技术。由于物联网具备实时感知、准确定位、有效控制等安防基本要素，显然会对安防产生重大影响，因此出现了物联网智能安防。它促使安防产业“互联网”化，使智能视频成为物联网发展的重要部分。而公共安全管理的关键是预先感知，物联网在公共安全方面应用的核心是智能化，使得我们能够建立相关技术平台、谋划事件预案，营造安全氛围，使社会环境更加平安、和谐。

物联网时代数量宏大的智能传感器，是人类感官功能的代替和提升，借助它们实现对物理世界的感知范围和感知精度的延伸。利用数据的多源采集所形成的海量异构数据，对公共安全事件进行数学模型分析，构建事件研判模型，以实现事件发展态势的科学推断。依托于物联网平台的智能处置技术和仿真技术，在公共安全事件快速反应演练、工作流程仿真训练、事件预警推演、警力布控调配、治安案件追溯还原等方面，均可发挥重大辅助决策作用，这也是公安物联网的重要需求。

物联网产业的发展，全世界目前都尚处于起步阶段，其中 RFID 及安防监控是公认的运用得最早、技术最为成熟的行业，尤其是在视频的运用方面，将会带来前所未有的市场增长。近来，公安物联网、智能安防、ITS 的建设步伐明显加快，而各地公安建设的重点也从以前的建设“平安城市”转换为建设数字城市、智能或“智慧城市”。

物联网有感知层、网络层和应用层三个主要层面。物联网的第一层就是感知层，而视频监控又是感知层最典型的应用，当前占到物联网应用的约 40% 以上。视频监控之所以在物联网中承担如此重要地位，主要原因有以下三个。

- (1) 视频监控应用最为广泛、市场规模最大，任何监控都要包括图像监控。
- (2) 视频监控是物联网发展初期技术可实现性最强的。
- (3) 随着社会对安全和治安的重视，未来行业推动因素多，行业推动的迫切性强。

智能安防是物联网当前最重要和最现实的应用平台之一，智能安防具有从“集约安防”到“智慧安防”转变之特征，从单一功能产品到多传感终端集成；从单一变量监测到周边环境全

面感知；从被动防御到基于模型分析与态势分析的主动防御，安防行业将会因此实现从提供产品到系统运营服务的全面升级，同时物联网还将对安防行业的发展格局及业务模式产生重大影响。

2012年2月14日，我国正式出台了“物联网“十二五”发展规划”，作为当前世界新一轮经济和科技发展战略制高点之一的物联网，对于促进经济发展和社会进步有重要的现实意义。“规划”圈定了重点发展的九大应用，包括产业类的智能工业、智能农业、智能物流、智能交通、智能环保，以及民生类的智能电网、智能安防、智能医疗和智能家居。由此也可看出，同物联网结合，就离不开智能化。

物联网作为一种技术和理念，也是一种应用和发展的模式。它通过云计算中心，将可按约定的协议将物体与互联网连接起来进行信息交换和通信等功能。物联网将可能实现人与物体之间的“对话”、物体和物体之间的“交流”，使得生活中的任何物品都可以变得“有感觉、有思想”。物联网的应用同时将为优化资源配置、加强科学管理、缓解资源能源约束提供可能与拓宽渠道。

由于现代安防系统的规模会变得庞大与复杂，因此它们都离不开物联网对其推波助澜。物联网的关键应用是视频，物联网的核心价值是智能。随着未来大型联网项目的急增以及IP高清监控带来新的数据管理难题，安防产业必将要采用云计算技术来解决海量数据的管理、检索、挖掘等诸多新课题。目前，安防产业得到初步应用的技术，包括视频、智能、GPS、传感等，都是物联网产业的核心技术。之前有人认为RFID传感技术是物联网最核心的技术，其实物联网技术最核心的不完全是RFID，而视频才是物联网最主要的技术难点之一。从采集方面来看，视频采集是一个非常烦琐的过程，视频的传输对带宽率的要求非常高，视频的定型、及数据的处理也都是难点；从管理方面来讲，视频的计算量是最为复杂的；从应用上来看，视频的应用也最为广泛。因此，未来的物联网发展必定是以“视频感知”为主，“视频”才是对物联网技术发展最大的挑战。

光纤技术与无线传输技术，以及集中管理系统软件，在目前的安防领域都有很重要的应用。安防行业的远程监看、远程控制、远程传输，以及远程存储、远程转发等大量工作，都需要高端的网络技术支撑。所以光纤技术与无线传输技术会随着物联网的发展而不断革新。同时，在网络端的集中管理和控制系统软件，也将得到更进一步的发展和应用。

从目前的发展状况来看，安防行业或多或少已经开始与物联网接轨了。而安防与物联网结合的最主要目的就是打造智能安防。显然，要构建智能安防，首先得做到感知网络化。在安防物联网的构建中，感应器（目前以RFID技术运用最为广泛）是必不可少的。无论是智能交通、平安城市、还是感知中国，都和关键部件感应器息息相关。因此，必须加大对安防配套的智能感应器的研发、生产。尤其是智能网络摄像机，智能网络的防盗、防火传感器等，否则，如何实现人与物、物与物的相连与智能化的监控和管理哩？

由前述可知，物联网安防是基于物联网发展需求，安防产品及技术在物联网实现过程中的应用，是安防应用领域的延伸，其本质就是安防产品智能化。因此可以说，物联网的实现也就是实现了安防的真正智能化。

1.5.3 现代安防监控技术的发展方向是物联网智能云安防技术

1. 智能化具有自动化、信息化和网络化三个特征

由安防新技术及系统系列精品丛书之二《安防&物联网——物联网智能安防系统实现方案》1.3节可知，我们对“智能化”的认识实际上是一个逐渐深化的过程。一般，早期认为智能化



就是什么流程都能自动进行了,因而将自动化等同于智能化了。但随着科技的发展,出现了一些新的智能产品,如傻瓜相机、智能洗衣机等等,它们能够从现场获取信息,并代替人做出判断和选择,而不仅仅只是流程的自动化,此时的智能化显然是“自动化+信息化”。

然而发展到今天,互联网的出现,或者说进入物联网时代,智能的含义又更进了一步。仅仅通过自动采集信息来做出判断和选择已经远远不够了,还必须要与网络相连,因为要随时把采集的信息,通过网络传输到数据中心或者指挥的本部,由指挥中心做出判断,以进行实时调整与处理。显然,这种动态管控和动态地自动选择,才是这个时代的“智能”。这也就是说,智能化应该具有,自动化、信息化和网络化三个特征。

2. 物联网智能云安防技术就是具体的“智慧安防”技术

由于安防监控技术的发展方向是智能化,即智能安防监控技术,这时的智能摄像机,就是一个智能传感器;当智能安防监控技术融合集成新兴的物联网技术后,就变为物联网智能安防监控技术,这时的一个智能摄像机,就不是一个智能图像传感器,而是它能实现的智能化功能有多少,就代表它有多少个智能传感器,或多少个无线传感器网络节点;而当物联网智能安防监控技术融合集成新兴的云计算技术后,就变为物联网智能云安防监控技术,这时主要是扩大了后端的计算与分析处理能力,从而可增加更多的智能化功能,即能使安防监控技术更加智能化。

由图 1-29 可知,安防技术的发展演进是,由模拟式向数字化、网络化、智能化、物联网智能安防化到物联网智能云安防化,从而使安防技术更加智能。因此,物联网智能云安防技术是安防技术发展的第 6 阶段,也就是现代安防技术发展的方向。

由于“智慧”的三要素是更透彻的感知、更全面的互连互通、更深入的智能化服务,因此,安防技术发展物联网智能云安防监控技术,实际就是人们经常说的“智慧安防”技术。

这样,就把“智慧安防”具体化了,就不会像以前那样抽象而难以理解了,所以“智慧安防”技术,实际上就是安防技术融合集成了智能技术、物联网技术、云计算技术后的物联网智能云安防技术。因为只有这样,才能更透彻地感知,更全面地互连互通,更深入地真正进行智能化服务。这样,衡量一个地区的安防是否达到了智慧化,就看它是否融合集成了智能技术、物联网技术、云计算技术这 3 个条件了,否则就不能加上“智慧”二字而称之为智慧安防。

显然,我想对于一个城市来说,要想加上“智慧”二字,也看这个城市是否融合集成了智能技术(即具有自动化、信息化和网络化三个特征)、物联网技术、云计算技术这 3 个具体条件了。如果没有达到这 3 个硬指标,就不配加上“智慧”二字。

显然,物联网智能云安防技术,就是在光电信息技术基础上的一门多学科交叉的前沿学科的综合性的应用科学技术,因而具有良好的发展空间和广阔的应用前景。

光电发光器件及其在 安防中的应用

在光电信息系统中，光是信息的载体，光源的质量对系统往往起着关键的作用。了解各种光源的基本特性参数和特点，对设计视频监控系统与光电信息系统是十分重要的。本章主要介绍光电信息系统与安防监控系统中常用的及新型的发光光源，如常用的普通光源、环保白光 LED 灯与平面分布式 OLED 灯、发光二极管、激光器主要是应用广泛的半导体激光器，并简介新的光纤激光器与光子晶体激光器）等，以及它们在安防系统中的应用。

2.1 常用的普通光源及其在安防中的应用

2.1.1 光源的基本特性参数

一般，要应用光源，必须了解它的特性参数才好进行光源的选择。通常光源有下列几个最基本的特性参数。

1. 发光效率

在给定的波长范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内，某一光辐射源所发出的辐射通量 Φ_e 与产生该辐射通量所需要的电功率 P 之比，称为该辐射源的辐射效率，它表示为

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) d\lambda}{P} \quad (2-1)$$

某一光源所发出的光通量 Φ_v 与产生该光通量所需要的功率 P 之比，称为该光源的发光效率，即

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P} = \frac{K_m \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{P} \quad (2-2)$$

式中， η_v 的单位为 lm/W。显然，在应用中宜选用发光效率高的光源，以节省能源。



2. 光谱的功率分布

光源输出的功率与光谱有关, 即与光的波长 λ 有关, 称为光谱的功率分布, 常见的有四种典型的分布, 如图 2-1 所示。

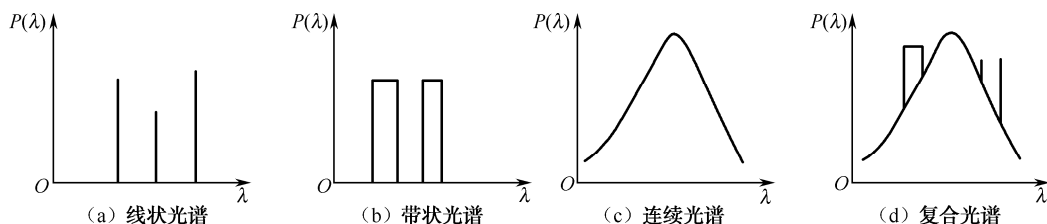


图 2-1 光源光谱的 4 种功率分布

图 2-1 (a) 为线状光谱, 它由若干条明显分隔的细线组成, 如低压汞灯光谱; 图 2-1 (b) 为带状光谱, 它由一些分开的谱带组成, 每一谱带中又包含许多连续的细谱线, 如高压汞灯光谱; 图 2-1 (c) 为连续光谱, 光源发出的谱线连成一片, 如白炽灯、卤素灯光谱; 图 2-1 (d) 为复合光谱, 它由连续光谱与线状、带状光谱组合而成, 如荧灯光谱。

在选择光源时, 为了最大限度地利用光能, 应选择光谱功率分布的峰值波长与光电器件的灵敏波长相一致, 其光谱的功率分布还应根据被检测对象的要求来决定。对于目视测量, 一般可以选用可见光谱辐射比较丰富的光源; 对于目视瞄准, 为了减轻人眼的疲劳, 宜选用绿光光源; 对于彩色摄像用光源, 为了获得较好的色彩还原, 则应该采用类似于日光色的光源, 如白炽灯、卤钨灯与氙灯。同样, 对于紫外和红外测量, 也宜选用相应的紫外灯 (氘灯、紫外汞灯、汞氙灯) 和红外灯等。

3. 光强的空间分布

由于光源发光的各向异性, 许多光源的发光强度在各个方向是不同的。若在光源辐射光的

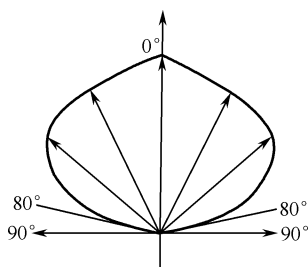


图 2-2 HG500 LED 配光曲线

空间某一截面上, 将发光强度相同的点连线, 就得到该光源在该截面的发光强度分布曲线, 称为配光曲线。HG500 型发光二极管的配光曲线如图 2-2 所示。为了提高光的利用率, 一般选择发光强度高的方向作为照明方向。为了充分利用其他方向的光 (如背面方向的光辐射), 可以安装反光罩, 反光罩的焦点应位于光源的发光中心上。

4. 光源的温度与颜色

(1) 光源的温度。由物理学知, 能够在任何温度下全部吸收所有波长辐射的物体称为绝对黑体 (黑体), 用人工方法制作的黑体辐射器, 其光谱辐射特性非常接近黑体。任何物体, 只要其温度在绝对零度以上, 就向外界发出辐射, 称为温度辐射。黑体是一种完全的温度辐射体, 黑体的温度决定了它的光辐射特性。对于非黑体辐射源, 它的某些特性常用黑体辐射特性近似地表示。一般地, 光源的温度常用色温、相关色温、分布温度表示。

色温是辐射源发射光的颜色与黑体在某一温度下辐射光的颜色相同, 则黑体的这一温度称

为该辐射源的色温。由于一种颜色可以由多种光谱分布产生,所以色温相同的光源,它们的相对光谱功率分布不一定相同。

若一个光源的颜色与任何温度下的黑体辐射的颜色都不相同,这时的光源即用相关色温表示,这个相关色温是指在均匀的色度图中光源的色坐标点与某一温度下的黑体辐射的色坐标点最接近,则该黑体的温度称为该光源的相关色温。

分布温度是指辐射源在某一波长范围内辐射的相对光谱功率分布与黑体在某一温度下辐射的相对光谱功率分布一致,这时该黑体辐射的分布温度就称为这个辐射源的分布温度。分布温度实际上是色温的一个特例,当光源的光谱能量分布和黑体相近时,该光源的色温就和它的分布温度一致了。

(2) 光源的颜色。光源的颜色通常包含有两方面的含义,即色表和显色性。一般用眼睛直接观察光源时所看到的颜色称为光源的色表,如高压钠灯的色表呈黄色,荧光灯的色表呈白色等。当用这种光源照射物体时,物体呈现的颜色(即物体反射光在人眼内产生的颜色感觉)与该物体在完全辐射体照射下所呈现的颜色的一致性,称为该光源的显色性。

显然,光源的颜色与发光波长有关,复色光源如太阳光、白炽灯、卤钨灯、镓灯等发光一般为白色,其显色性较好,适合于辨色要求较高的场合,如用于彩色摄像、彩色印刷及染料等行业。高压汞灯、高压钠灯等显色性差一些,一般用于道路、隧道、码头等颜色要求较低的场合。还有单色光源,如 He-Ne 激光为红色、氪灯与钠灯发光为黄色、氙光为紫色等,用于要求单色的地方。总之,光的颜色对人眼的工作效率有影响,如绿色比较柔和,而红色则使人容易疲劳,因此用颜色来进行检测也是一门专门的技术。

在光电信息系统中,为了减少光源温度对系统的影响,应采用冷光源或者设法减少热辐射的影响。

2.1.2 常用的普通光源

常用的普通光源有热辐射光源与气体放电光源两类。

1. 热辐射光源

物体温度大于绝对零度时就会向外辐射能量,物体由于温度较高而向周围温度较低环境发射能量的形式称为热辐射,其辐射以光子形式进行,因而我们就会看到光。这种热辐射的物体就称为热辐射光源,常见的热辐射光源有以下几种。

(1) 太阳光。太阳是直径约为 $1.392 \times 10^9 \text{ m}$ 的光球,它到地球的年平均距离是 $1.496 \times 10^{11} \text{ m}$ 。因此,从地球上观看太阳时,太阳的张角只有 0.533° 。太阳光谱能量分布相当于 5900 K 左右的黑体辐射,其平均亮度为 $1.95 \times 10^9 \text{ cd/m}^2$ 。

太阳向地球辐射的热称为阳光,阳光是复色光,太阳光源是很好的平行光源。太阳光的照度值在不同光谱区所占百分比是不同的,紫外区约占 6.46% ,可见光区占 46.25% ,红外光区占 47.29% 。

辐射到地球上的太阳光,要穿过一层厚厚的大气层,因而在光谱、空间分布、能量大小、偏振状态等方面都发生了变化。大气中有光谱选择性的吸收介质,如水气、氧、臭氧、二氧化碳、一氧化碳,以及其他碳氢化合物等,都会在不同程度上吸收太阳辐射。

(2) 白炽灯。白炽灯是光电信息系统中最常用的光源之一,它发射的是连续光谱,在可见

光谱段中部和黑体辐射曲线相差约 0.5%，而在整个光谱段内和黑体辐射曲线平均相差 2%。由于它的发光特性稳定、简单、可靠，使用和量值复现方便，因而得到广泛应用，并且也用作各种辐射度量与光度量的标准光源。

白炽灯有真空钨丝灯、充气钨丝灯和卤钨灯等。真空钨丝灯是将玻璃灯泡抽成真空，钨丝被加热到 2 300~2 800 K 时发出复色光，其发光效率低，约为 10 lm/W。

充气钨丝灯是在灯泡中充入和钨不发生化学反应的氩气、氮等惰性气体，当灯丝蒸发出来的钨原子与惰性气体原子相碰撞时，部分钨原子会返回灯丝表面而有效地抑制钨的蒸发，从而延长灯的寿命，使工作温度提高到 2 700~3 000 K，发光效率提高为 17 lm/W。

卤钨灯是在灯泡内充有卤族元素（氯化碘、溴化硼等），钨丝被加热后，蒸发出来的钨原子在玻璃壳附近与卤素合成为卤钨化合物，如 WI_2 、 WBr_2 等。然后，卤钨化合物又扩散到温度较高的灯丝周围且又被分解成卤素和钨，而钨原子又沉积到灯丝上，弥补钨原子的蒸发，以此循环而延长灯的寿命，使卤钨灯的工作温度达 3 000~3 200 K，发光效率提高到 30 lm/W。

白炽灯的灯压决定了灯丝的长度，供电电流决定了灯丝的直径，100 W 的钨灯发出的光通量大约为 200 lm。白炽灯的供电电压对灯的参数（电流、功率、寿命和光通量）有很大的影响，例如额定电压为 220 V 的灯泡降压到 180 V 使用，其发光的光通量降低到 62%，但其寿命延长 13.6 倍。灯泡寿命的延长将使光电系统的调整次数大为减少，也提高了系统的可靠性。如光栅莫尔条纹法测量，常用 6 V、5 W 的白炽灯照明，若降压至 4.5 V 使用，灯的寿命将延长 20 倍左右。

白炽灯泡的灯丝形状对发光强度的方向性有影响，普通照明常用 W 形灯丝，使灯 360° 发光；而光栅莫尔条纹测量则用直丝形状灯泡，且灯丝长度方向应与光栅刻线方向一致。

2. 气体放电光源

利用气体放电原理来发光的光源，称为气体放电光源。例如，将氢、氦、氖、氙、氪或者金属蒸气（汞、钠、硫等）充入灯中，在电场作用下激励出电子和离子。当电子向阳极，离子向阴极运动时，由于其已经从电场中获得能量，当它们再与气体原子或分子碰撞时激励出新的原子和离子，如此碰撞不断进行，使一些原子跃迁到高能级。由于高能级的不稳定性，处于高能级的原子就会发出可见辐射（发光）而回到低能级。如此不断地进行，就实现了气体持续放电、发光，这就是气体放电发光的原理。

由于气体放电光源可充不同的气体或金属蒸气，从而形成放电介质不同的多种光源，即使充同一种材料，由于结构不同又可构成多种灯。如汞灯就可分为：低压汞灯（<0.8 Pa），这又可分为冷阴极辉光放电型和热阴极弧光放电型两类；高压汞灯（1~5 Pa），发光效率达 40~50 lm/W；超高压汞灯（10~200 Pa）。又如氙灯，其辐射光谱也是连续的，与日光的光谱能量分布相接近，色温 6 000 K 左右，显色指数达 90 以上，因此有“小太阳”之称。氙灯又分脉冲氙灯、长弧氙灯和短弧氙灯。此外，还有用于微量元素光谱分析的原子光谱灯等。

总之，气体放电光源的种类很多，但它们具有的共同特点是：

（1）发光效率高，比同瓦数的白炽灯高 2~10 倍，因而可节省能源。

（2）结构紧凑，耐震、耐冲击。

（3）寿命长，大约是白炽灯的 2~10 倍。

（4）光色适应性强，可在很大范围内变化。如普通高压汞灯发光波长为 400~500 nm，低压汞灯则为紫外灯，钠灯呈黄色（589 nm），氙灯近日色，而水银荧光灯为复色。

由于以上特点，气体放电光源具有很强的竞争力，因而经常被用于工程照明和光电信

息系统之中。

2.1.3 常用的普通光源在安防中的应用

1. 在视频监控中作照明光源

众所周知,要监控所需的场景,必须有光源对监控场景的照明。在选择照明光源时,除主要考虑它的指标和能量要求外,还必须考虑它的尺寸、形状、光源与光源之间的距离,以及光源与被照表面之间的距离。要想为建筑中的门厅、楼梯间、周界、停车场等场所的安全应用提供充足的照明光线,就必须采用不同的照明光源设计。有关光源在安防视频监控中的选用等详情,可参阅本书参考文献[5]《安防视频监控实用技术》的2.2节

值得指出的是,大多数视频监控系统工程,实际上都是在已建好的建筑物和已有照明光源的情况下进行的,因而视频监控系统的设计者常常无法在监控现场增加照明光源设施,或更改原有的照明光源系统的设计,所以,只能先评估监控现场的照度水平,再选择适合这个照度水平的摄像机来获得满意的图像。在现场的照明光线确实不够用的情况下,往往只能在现有的照明光源设施中间加装新的照明灯具,以满足摄像机对监控现场的照度的需要。

现场中的自然光源和人造光源会极大地影响视频监控系统最终取得的图像质量,以及监控场景画面中所携带的信息量。如要取得最理想的效果,就必须仔细分析光源的各种指标(如光谱组成、照度、光束模式等),并使其与摄像机的光谱特性和灵敏度相匹配。在设计彩色视频监控系统时,更需加倍小心,因为彩色摄像机只有在白天的自然光线和宽频谱的人造光线下才能正常工作。如果现场的照度看起来不太够,应该使用硅光电池探测的照度计,实际测量一下摄像机的安装位置可以接收到的光线照度值。如果在使用标准摄像机时,光线仍不够充足,就要使用额外的照明光源,或者采用灵敏度更高的增强型低照度摄像机才行。

2. 作热红外光源

随着安防行业的发展,24小时不间断地监控对夜视要求越来越高,尤其要求夜间隐蔽性监控。因为传统式的照明灯光经常会引起别人的注意,会提醒入侵者“装有视频监控系统”,或者会影响周围的住户。而安装红外光源则不存在这些问题。因为红外光是一种波长大于780 nm的不可见光。

一般,产生这种不可见光的红外光的方法有下列三种。

(1) 热红外光源:直接使用白炽灯或氙灯发出的红外光,即在这两种灯上安装可见光滤镜滤去可见光,只让看不见的红外射线射出。

(2) 红外发光二极管 LED 光源:即用红外 LED 或 LED 阵列来产生红外光。这种器件是通过半导体中的电子与空穴复合来产生红外光的。

(3) 半导体红外激光光源:即使用红外激光二极管 LD,它把处于较低能态的电子激发或泵浦到较高能态上去,通过大量粒子分布反转,共振而维持受激辐射。

前两种方法都能生成或窄或宽的光束。在使用对红外线较为敏感的摄像机,如 CCD 或 CMOS 摄像机、低照度增强型摄像机观察场景时,可以获得质量相当高的图像。第三种光源的光束细而强,要照亮一定范围的场景,需要通过光学扩束镜头扩束,目前多用于 1 km 以上距离的监控场景的夜视照明。这里只介绍第一种用普通光源作的热红外光源,其余两种将在后面陆续论述。



通常，物体在温度较低时产生的热辐射全部是红外光，所以人眼不能直接观察到。在热辐射光源中通过加热灯丝来维持它的温度，供辐射继续不断地进行。辐射体在不同加热温度时，辐射的峰值波长是不同的，其光谱能量分布也是不同的。根据以上原理，经特殊设计和工艺制成的红外灯泡，其红外光成分最高可达 92%~95%。

红外灯泡最大的优点是可制成比较大的功率和大的辐照角度，因此照射距离远。其最大不足之处是包含可见光成分，即有红暴，且使用寿命短，如果每天工作 10 h，只能使用一年多，若考虑散热不够，寿命还要短。为提高热辐射红外灯的寿命，采用了光控开关电路，以减小其工作时间。此外，还增加了延时开关电路以防环境光干扰。

一般，氙灯和白炽灯可以照亮距离摄像机一百多米外的场景，因此，在其前端配一个只让红外线通过的滤镜，完全可以为隐蔽式视频监控系统提供足够的红外射线。由于这种热红外光源要消耗大量的能量，产生大量的热，所以这种光源需要配备特制的散热器或冷却设备，才可以使其能够持续工作。热红外光源照明系统，通过配用不同的前镜头，可以发出用于覆盖较大范围场景的宽光束或用于观察远处目标的聚光束等不同形状的光束，以适应现场的具体需要。表 2-1 列举了常用热红外灯的类型，以及它们的水平和垂直光束角及照射距离。由表 2-1 可见，光束角最窄可以达到 10°，最宽则可以达到 60°。

表 2-1 常用热红外光源及其光束角与照射距离

光源的类别	灯的种类	输入功率及电压	光束角 (°)	照射距离 (m)
宽泛光灯	带滤镜的卤钨白炽灯	100 W	水平 60/垂直 60	9.1
聚光灯	带滤镜的卤钨白炽灯	100 W	水平 10/垂直 10	61.0
宽泛光灯	带滤镜的卤钨白炽灯	500 W	水平 40/垂直 16	27.4
聚光灯	带滤镜的卤钨白炽灯	500 W	水平 12/垂直 8	137.2
泛光灯	带滤镜的弧氙灯	400 W、交流	40	152.4
聚光灯	带滤镜的短弧氙灯	400 W、交流	12	457.2

注：卤钨灯和氙弧灯使用的滤镜是可见光阻隔滤镜。

此外，常用普通光源目前还被用作 LCD 显示及其投影显示的背光源等。

2.2 发光二极管 LED 及其在安防中的应用

发光二极管 (LED) 是一种直接注入电流的电致发光器件，其半导体晶体内部受激电子从高能级回复到低能级时发射出光子，属于自发辐射跃迁。LED 为非相干光源，具有较宽的谱宽 (30~60 nm) 和较大的发射角 (≈100°)，常用于低速、短距离光传输系统。在安防视频监控中主要用于光发射端机与主动式红外发光光源等。

2.2.1 发光二极管 (LED) 的结构及其发光原理

1. 发光二极管 (LED) 的结构

发光二极管由 P 型和 N 型半导体组合而成。它实际是将 PN 结管芯烧结在金属或陶瓷底座

上, 欧姆接触引出两根金属引线, 然后用透明环氧树脂封装而成。

LED 的结构既可以采用 PN 同质结结构, 也可采用 PN 异质结结构。异质结结构可以控制发光面积和消除由透明包层引起的吸收, LED 普遍采用双异质结结构, 从而使 LED 具有优异的工作特性。

LED 品种繁多, 结构和性能各异。由于可以制造出材料、结构、发光颜色、发光面特征、功能不同的 LED, 从而为 LED 提供了广阔的应用空间, 成为时下首选的绿色环保光源。目前, 根据发光方向、发光功率、耦合效率、是否有谐振腔的不同, 光纤通信中所用的 LED 的结构可以分为如下的几个类型:

- 面发光二极管 (Surface Light Emitting Diode, SLED);
- 边发光二极管 (Edge Light Emitting Diode, ELED);
- 超辐射 (或超高亮度) 发光二极管 (Superluminescent Light Emitting Diode, S-LED);
- 谐振腔发光二极管 (Resonant Cavity Light Emitting Diode, RC-LED);
- 量子点发光二极管 (Quantum Dot Light Emitting Diode, QD-LED 或 QLED)。

上述 QLED 将在 9.1.5 节中论述, 欲了解其余 4 种 LED 的详情, 可参阅本书参考文献[13]。

2. 发光二极管 (LED) 发光的基本原理

当 PN 结加上正向电压时, 结区势垒降低, P 区的空穴载流子 p 向 N 区扩散, N 区的电子 n 向 P 区扩散, p 与 n 在 PN 结区相遇复合, 从而释放能量而发光。

光的波长(决定光的颜色)由形成 PN 结构的材料决定, 因而可以制造各种不同波长的 LED。目前实用的发光二极管大多用 III~V 族半导体材料制成, 用这些材料制成的发光二极管的特性参数如表 2-2 示。

表 2-2 各种材料制成的发光二极管的特性参数

材料	禁带宽度/eV	峰值波长/nm	结构	颜色	外部效率/%
GaAs		940	PN	红外	
GaP	2.24	585	PN	黄	
GaP (Zn, O ₂)	2.24	700	PN	红	1.0
GaP (Zn, N ₂)	2.24	565	PN	绿	0.1
GaAs _{1-x} P _x	1.84~1.94	620~680	PN	红	0.3
Ga _{1-x} Al _x As	1.80~1.92	640~700	PN	红	0.4
GaN	3.5	0.44	MIS	蓝	0.01~0.1

3. 发光二极管 (LED) 的主要特点

(1) 工作电压低, 有的仅需 1.5~1.7 V 即能导通发光, 一般正向电压约为 2 V, 因而能直接与集成电路匹配使用。

(2) 工作电流小, 其典型值约为 10 mA。

(3) 具有和普通晶体二极管相似的单向导电特性, 只是死区电压略高些。

(4) 具有和硅稳压二极管相似的稳压特性。

(5) 响应速度极快, 时间常数为 10^{-6} ~ 10^{-9} s, 有良好的频率特性, 调制频率可以很高。

(6) 小巧轻便、耐震动、寿命长, 一般可达 10 万小时以上。

(7) 主要缺点是发光效率低, 有效发光面很难做大。

2.2.2 发光二极管 (LED) 的主要特性参数

1. LED 的效率

(1) 功率效率 η_p 。即将输入的电功率 P_i 转换成辐射的功率 P_e 的效率, 即

$$\eta_p = P_e / P_i \times 100\% \quad (2-3)$$

要提高 η_p , 就是要提高在一定电功率输入下的辐射功率输出, 也就是减小器件的无用电功率损耗。如做好欧姆接触, 以减小焦耳热的损耗功率等。

(2) 光学效率 η_o 。即外量子效率 η_{qe} 与内量子效率 η_{qi} 的比, 即

$$\eta_o = \eta_{qe} / \eta_{qi} \quad (2-4)$$

光学效率可用来比较外量子效率的相对大小。所谓量子效率, 是指注入载流子复合而产生的光量子的效率。但由于内吸收和内反射等原因, 使得产生的光量子不能全部射出, 因此量子效率又分为内量子效率和外量子效率。内量子效率等于辐射复合所产生的光子数 N_T 与激发时注入的电子空穴对数 G 之比, 即

$$\eta_{qi} = N_T' / G \quad (2-5)$$

由于半导体材料的折射率较高, 反射和吸收的损失很大, 所以辐射复合所产生的光量子不能全部射出器件之外。外量子效率是射出的光子数 N_T 与注入的电子空穴对数 G 之比, 即

$$\eta_{qe} = N_T / G \quad (2-6)$$

提高光学效率的方法就是减少吸收 (选择最佳结深等) 与晶体表面的内反射损失 (选合适的封装材料等)。

(3) 流明效率 η_L 。也称为光度效率或发光效率。即用于显示的人眼衡量的效率, 它表示消耗单位电功率 P_i 所得到的光通量 F , 即

$$\eta_L = F / P_i \quad (\text{lm/W}) \quad (2-7)$$

而

$$\eta_L = \eta_p \cdot \eta_b \quad (2-8)$$

式中, η_b 为照明效率, 它是辐射功率转换成光通量的效率, 即

$$\eta_b = F / P_e \quad (\text{lm/W}) \quad (2-9)$$

显然, 提高 η_L 的方法就是提高 η_p 和 η_b , 即使发射光谱与视见函数有最大的重叠。

2. LED 的伏安特性与 P-I 特性

发光二极管的伏安特性如图 2-3 所示, 它与普通二极管的伏安特性大致相同。电压小于开启点的电压值时无电流。电压超过开启点就显示出欧姆导通特性。发光二极管的反向击穿电压一般在 -5 V 以上。由于 LED 的正向伏安曲线较陡, 故在应用时必须串接限流电阻, 以免烧坏管子。在直流电路中, 其限流电阻 R 可用下式估算。

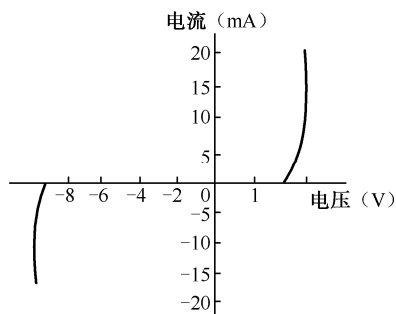


图 2-3 LED 的伏安特性

$$R=(E-U_F)/I_F \quad (2-10)$$

式中, E 为电源电压; U_F 为 LED 的正向压降; I_F 为流过 LED 的电流。在交流电路中, 限流电阻 R 为

$$R=(e-U_F)/(2I_F) \quad (2-11)$$

式中, e 为交流电源电压的有效值。

LED 正向伏安特性曲线比较陡, 在正向导通之前几乎没有电流。当电压超过开启电压时, 电流就急剧上升。其发光亮度 L 与正向电流 I_F 近似成正比, 其公式为

$$L=KI_F^n \quad (2-12)$$

式中, K 为比例系数, 在小电流范围内 ($I_F=1\sim 10\text{ mA}$), $n=1.3\sim 1.5$; 当 $I_F>10\text{ mA}$ 时, $n=1$ 。通常情况下, 流过 LED 的电流不会低于 10 mA , 此时, 式 (2-12) 可简化为

$$L=KI_F \quad (2-13)$$

即亮度与正向电流成正比。因此, 可以通过流过 LED 的电流来控制 LED 的亮度。LED 的正向电压则与正向电流, 以及管芯的半导体材料有关。实用时应根据所要求的显示亮度来选取合适的 I_F 值 (一般选 10 mA 左右, 对于高亮度 LED 可选 20 mA , 超高亮度的 LED 的工作电流可达 100 mA 以上)。

图 2-4 是 LED 的 $P-I$ 特性曲线。LED 是自发辐射光, 所以 $P-I$ 曲线的线性范围较大。

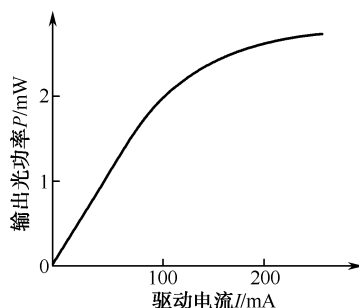


图 2-4 LED 的 $P-I$ 特性

3. LED 的光谱特性

LED 没有光学谐振腔选择波长, 它的光谱是以自发辐射为主的光谱, 其典型光谱曲线如图 2-5 所示。发光光谱曲线上发光强度最大处所对应的波长为发光峰值波长 λ_P , 光谱曲线上两个半光强点所对应的波长差 $\Delta\lambda$ 为 LED 谱线宽度 (简称谱宽), 其典型值在 $30\sim 40\text{ nm}$ 之间。

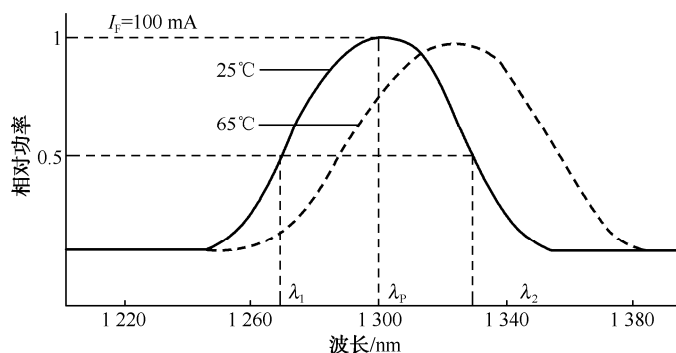


图 2-5 LED 的光谱特性曲线

由图 2-5 可以看到, 当器件工作温度升高时, 光谱曲线随之向右移动 (如图中虚线所示)。值得指出的是, 从 λ_P 的变化, 还可以求出 LED 的波长温度系数。

4. LED 的调制特性

当在规定的直流正向工作电流下,对 LED 进行数字脉冲或模拟信号电流调制,便可实现对输出光功率的调制。LED 有两种调制方式,即数字调制和模拟调制,如图 2-6 所示。

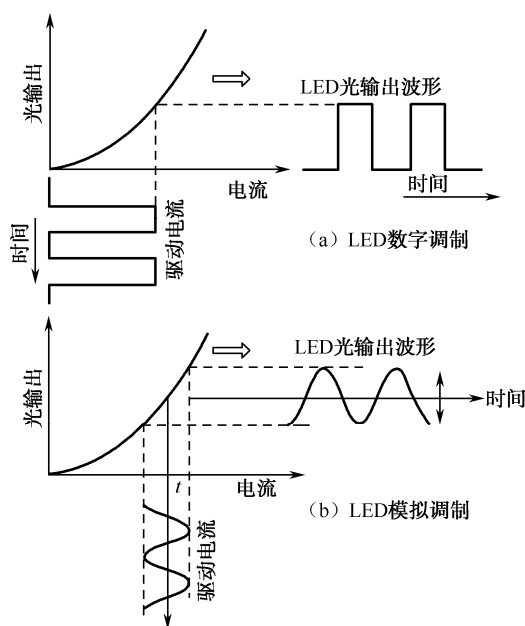


图 2-6 LED 的调制特性

调制频率或调制带宽是光传输通信用 LED 的重要参数之一,它关系到 LED 在光传输通信中的传输速度大小。LED 因受到有源区内少数载流子寿命的限制,其调制的最高频率通常只有几十 MHz,从而限制了 LED 在高比特速率系统中的应用。但是,通过合理设计和优化的驱动电路,LED 也有可能用于高速光纤传输通信系统。

调制带宽是衡量 LED 的调制能力,其定义是在保证调制制度不变的情况下,当 LED 输出的交流光功率下降到某一低频参考频率值的一半时 (-3dB) 的频率,就是 LED 的调制带宽。

2.2.3 发光二极管 (LED) 在安防中的应用

发光二极管的应用很广,如可用来进行数字、文字及图像显示,照明与指示,以及制作光开关、光电报警、光电遥控器及光电耦合器件等。

由于 LED 的颜色、尺寸、形状、发光强度及透明等情况不同,使用时,首先应根据实际需要进行恰当选择;其次要注意 LED 的极限参数的限制,即允许功耗 P_M 、最大正向直流电流 I_{Fm} 、最大反向电压 V_{Rm} 、工作环境温度范围等。因此使用时,应保证不超过此限制值。为安全起见,实际工作电流 I_F 应选在 $0.6I_{Fm}$ 以下,应让可能出现的反向电压 $V_R < 0.6V_{Rm}$ 。

发光二极管在安防监控中的应用也很广,如作为各种光信息源,在夜视技术中主要作红外光源等。

1. 用作各种光信息源

(1) 光纤传输系统中光发射端机的光信息源。由本书参考文献[1]的 7.1.4 节与文献[5]的 5.1.2 节知, 光纤传输系统相比同轴电缆等传输系统有 10 条明显的优势。因此, 在需要传输高清高质量图像画面时, 它是一种首选的传输手段。

但在光纤传输系统中, 连接光纤光缆两端的是光发射端机与光接收端机, 而在光发射端机中光电发光器件是其核心部件。通常, 大多使用 LED, 它将电信号转换为光信号经光纤光缆传输到远端的光接收端机, 由光接收探测器件还原成电信号输出。

(2) 作红外光波传输的光信息源。红外光波传输系统是无线光传输技术, 同样它也需要光发射端机与光接收端机, 详细情况可参阅本书参考文献[1]中 7.2 节, 本书 6.3 节也将介绍, 这里就不再叙述了。

(3) 作主动式红外报警的红外光信息源。所谓主动式即能主动发射红外光。当被探测目标侵入所防范的警戒线, 遮挡了红外发射机与接收机之间的红外光束, 而进入报警状态的电子装置就称为主动式红外探测器。它的基本组成与工作原理, 如图 2-7 所示。

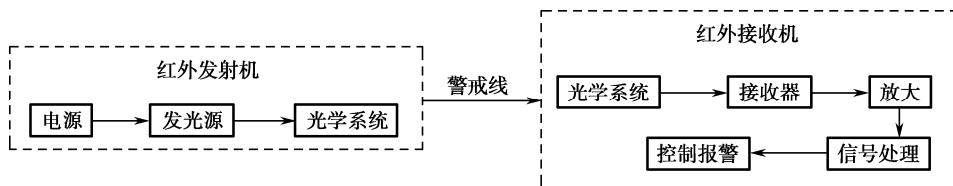


图 2-7 主动式红外探测器的组成与原理

由图可知, 主动式红外探测器由红外发射机与红外接收机 2 大部分组成。红外发射光源, 通常用砷化镓红外发光二极管(或砷镓铝双异质结半导体激光器)等。它采用自激多谐振荡器作为调制电源, 使它产生很高占空比的脉冲波形, 去调制红外二极管发光。这样, 就大大降低了电源的功耗, 提高了灵敏度, 又增加了系统抗杂散光的干扰能力。

这种对光束遮挡型的探测器, 要适当选取有效的报警最短遮光时间。因为遮光时间选得太短, 会引起不必要的噪声干扰, 如小鸟飞过、小动物穿过都会引起报警; 而遮光时间选得太长, 又可能导致漏报。因此, 通常以 10 m/s 的速度通过镜头的遮光时间, 来定最短遮光时间。如人的最小宽度为 20 cm, 则最短遮断时间为 $20\text{ cm}/(10\text{ m/s})=20\text{ ms}$ 。所以, 最短遮光时间大于 20 ms, 系统报警; 遮光时间小于 20 ms, 则不报警。

主动红外探测器多采用双光路或多光路, 被广泛使用在周界报警系统工程中。这种主动红外周界入侵探测报警系统产品, 做得较好的有广州天网安防科技有限公司的新型远距离红外线幕墙。

该产品红外发光二极管采用 940 nm 波长, 并采用光编码调制红外线射束, 而使幕墙隐蔽而抗干扰。它只有在任意相邻的两根红外线射束被同时阻断规定时间 20 ms 时, 才产生报警, 绝不会由于飞鸟、昆虫等飞过而引发误报警。

(4) 作光纤周界报警的红外光信息源。红外发光二极管除用于上述的红外线幕墙周界防范外, 也用于光纤传感的周界报警的红外光信息源。如光纤布拉格光栅传感周界报警系统的红外光信息源就多是使用的侧面发光二极管。

(5) 作安防系统的红外遥控开关与防火防盗门铃三用传感器的信息源。众所周知, 红外发



光二极管多用于家用电视机与空调等的遥控器中，现也用作安防系统与设备的红外遥控开关。

作者曾指导两名大学生做学校基金项目——防火防盗门铃三用传感器，并在省高校科研成果展中展出后获省二等奖。

2. 用作夜视技术中的主动红外光源

根据第1章波长 $\lambda=1240/E_g$ (nm) 知, E_g 是某半导体材料导带与价带之间的禁带宽度(单位为电子伏特)。因此, 当采用砷化镓半导体(当然也还有其他材料的半导体)时, 其禁带宽度 E_g 决定它只能发出近红外光。砷化镓 LED 的电源线共有两根, 在加正向电压通电后, 即会发出近红外光, 光线经过前端球形镜头的放大后就会射到场景中去。LED 的最大辐射强度一般在光轴的正前方, 并随辐射方向与光轴夹角的增加而减小。辐射强度为最大值的 50% 的角度称为半强度辐射角。不同封装工艺型号的红外发光二极管的辐射角度有所不同。砷化镓发光二极管的光转换效率也相当高, 一般可以将 50% 的电能转换成红外光辐射能量。这种灯在略高于室温的温度下工作时, 几乎不发热, 因此也就不需要特别的冷却装置。

要想照亮一定距离的场景, 常常需要几十、几百个 LED 构成的平面式阵列。因此, 可根据场景的情况, 尤其距离的远近来配备 LED 的多少。各个发光二极管的红外光输出合并起来, 就可以产生足够多的光线, 使其足以照亮被监视的现场, 从而使得 CCD 与 CMOS 摄像机可以产生高质量的黑白视频图像。此外, 还可将红外发光二极管装在镜头上, 与黑白 CCD 摄像机配用, 或直接装在摄像机与镜头接口周围的机壳上。显然, 这两种装配的红外 LED 少, 其照射的距离肯定不如单独的红外 LED 阵列灯照射的远。

这种发光器件和白炽灯泡相比, 有体积小、耐冲力、寿命长、功耗低、响应快、可靠性高、颜色鲜明、易和集成电路匹配等特点, 因而获得了广泛应用。

目前, 红外 LED 光源已由第一代传统的 LED, 第二代小功率阵列式 LED, 发展到第三代大功率阵列式 LED (即 LED Array)。它首先由美国 Pacific Cybervision 公司开发生产, 其每颗 LED Array 可集成 60 粒 LED 发光晶体, 一开始时光学输出就达到了 800~1 000 mW, 而目前, 新一代的单个 LED Array 的光学输出就已经能做到 4 000 mW 以上, 发光半功率角为 10~120° (可变角)。它既有第二代红外 LED 灯的体积小, 散热处理好, 寿命长的优势, 又解决了第二代红外 LED 阵列式光源因偏心而不够亮的缺点。这种大功率阵列式 LED 的价格接近或低于传统 LED, 是集第一代、第二代优点于一身, 并完全避免了缺点的新一代红外 LED 光源, 目前已成为高质量夜间监控的一种理想选择。

第三代红外 LED 光源填补了第一代传统 LED、第二代阵列式光衰快, 使用寿命短, 电光转换效能低, 亮度不足, 散热性能不良, 功耗大等缺点, 是全球红外夜视技术领域的新的突破。这种新一代的红外光源在产品性能与应用等方面与激光红外相比, 也有明显的优势。它以先进的集成与独特的封装技术, 类似单颗灯形式完全取代第二代多颗灯模式, 不仅电光转化效率高, 而且降低了功耗。又由于散热性能良好, 使用寿命是激光红外与传统红外灯的 4~5 倍, 因而已广泛应用于安防视频监控市场。

3. 用 LED 作显示器

由于安防监控场景需要在监控中心显示, 因而需要显示器。所以, 显示器是安防监控系统的重要终端设备, 但它们都是光电信息技术中的基本的光电器件, 即电光转换器件构成的。LED 可用于数字、文字及图像显示, 这在日常生活中到处可见, 详情可参阅本书参考文献[1, 2],

这里仅简介用 LED 制作的点阵式显示器。

通常,把发光二极管作矩阵排列,最常用的点阵式显示器为 5×7 矩阵,考虑到要显示小数点时,需要 $5 \times 7 + 1 = 36$ 个发光单元,13 根引出线,其显示原理如图 2-8 和图 2-9 所示。它除能完成数码管所能显示的字符外,还能显示文字和一些其他符号。

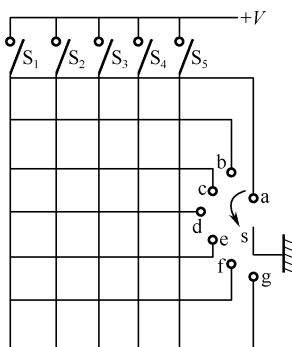


图 2-8 5×7 点阵显示电路
(纵向转换, 横向输入信号)

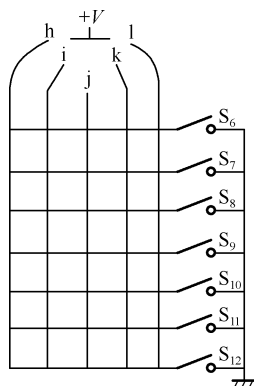


图 2-9 5×7 点阵显示电路
(横向转换, 纵向输入信号)

图 2-8 是从横向(行)输入信号,用纵向(列)转换开关来进行显示。图 2-9 是从纵向输入信号,用横向转换开关来进行显示的。该显示器用扫描驱动方式,选择较大峰值电流和窄脉冲作驱动源,每个 LED 的平均电流不应超过 20 mA。根据显示文字的各点坐标,在扫描过程中利用脉冲来控制开关的启闭,使组成文字的各点顺序发光。虽然发光是闪烁的,但由于人眼的余像效应,看起来仍是一个静止的文字。

如果将这种 LED 点阵管多块组合,则可构成大屏幕显示屏(参见后面光电显示技术)。目前,LED 作为显示元件已发展到彩色和大面积的汉字、图表、图像(含安防监控场景)等的显示,并被广泛用于机场、车站、码头,以及许多公共场所的指示、说明、广告等场合。

此外,目前发光二极管也已被用于液晶显示器的背光源等。

2.3 环保白光 LED 与平面分布式 OLED 光源及其在安防中的应用

2.3.1 固体环保白光 LED 光源及其在安防中的应用

随着光电技术及材料科学的发展,1998 年基于蓝光 LED 芯片的白光 LED 被成功开发出来,这一创新是 LED 照明的巨大转折。目前,商品化的白光 LED 器件已达到白炽灯(发光效率 16 lm/W)的水平,其发光效率已接近荧光灯(20 W 的灯管为 60 lm/W,40 W 的灯管为 100 lm/W)的水平,并且在稳步增长之中。根据应用对象的不同,允许 LED 多颗组合。由于 LED 的低电压、低电流,因而白光 LED 发热量低,耗电量小。又因为 LED 可以回收,不会变成环境污染的废弃物,所以白光 LED 是环保产品。由于这种固体光源具有耐震动、抗冲击、长寿命和无污染等独特的优点,因此公认它是 21 世纪的新一代光源,即第三代电光源。所以,白

光 LED 必将替代白炽灯、荧光灯和高压气体放电灯等传统光源，而用于照明和视频监控系统之中。目前，我国每年用于照明的电力接近 2 500 亿千瓦时，如采用半导体照明，每年可节省 2 200 多亿千瓦时，而这数字是三峡电站目前的年发电量的 3 倍。

1. 白光 LED 的结构与原理

众所周知，白光是多种颜色的光混合而成。以人类眼睛所能见的白光形式，至少需要两种以上的光混合，因此一般有下列两种混合方式。

(1) 单晶型：二波长光，即蓝色光与黄色光混合。具体是在蓝色 LED 芯片里涂敷高效黄色荧光粉，蓝光及被蓝光激发的荧光粉发射的黄光相混互衬后得到不同色温的白光。

蓝光 LED 芯片涂敷黄色荧光粉的方法如图 2-10 所示。其中 GaN 芯片发蓝光（峰值波长 $\lambda_p=465\text{ nm}$ ，半强度宽度 $\Delta\lambda=30\text{ nm}$ ），YAG 荧光粉首次被蓝光激发后发出黄色光，其峰值波长 570 nm ；LED 基片发出的蓝光部分被荧光粉吸收，另一部分蓝光与荧光粉发出的黄光混合，从而得到白光。

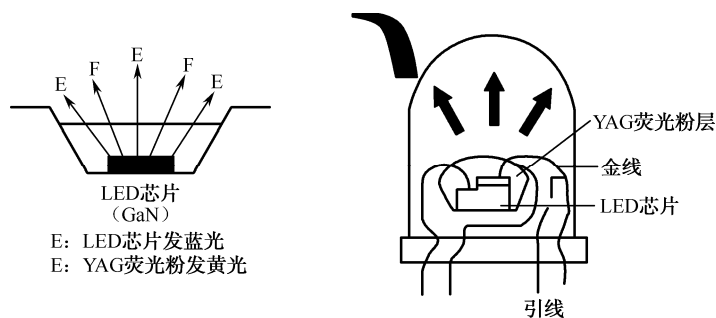


图 2-10 白光 LED 结构示意图

(2) 多晶型：三波长光，即红色光、绿色光与蓝色光混合，即直接将红、绿、蓝三种颜色的 LED 芯片组成一组，实现白光。这种方式的显色指数高，符合一般的照明要求。目前已商品化的三波长光产品，大多以无机紫外光晶片加 R、G、B 三种颜色荧光粉。此外，用有机单层三波长型白光 LED 也有成本低、制作容易的优点。总之，三色合成白光综合性能最好，目前世界各生产厂家大都在走此途径。

2. 白光 LED 的特点及与现行照明光源的比较

(1) 白光 LED 的特点。与白炽钨丝灯泡及荧光灯相比，它具有以下突出特点。

- 全固体、结构简单、体积小；
- 省电，其电能消耗仅为白炽灯的 1/10、荧光灯的 1/2，如采用白光 LED 照明，全国每年可节电 2 200 多亿千瓦时；
- 寿命长，一般可达 10 万小时，是荧光灯的 10 倍，白炽灯的 100 倍；
- 响应快，加电即亮，反应速度快，可在高频操作；
- 真正的绿色环保光源，耐震、耐冲击、不易破碎、无毒、且废弃物可回收，光谱中没有紫外线和红外线，因而不发热也无辐射，是真正的绿色环保光源；
- 理论光效率高；
- 可平面封装，易开发成轻薄短小的产品。



(2)白光 LED 与现行照明光源的比较。白光 LED 灯基本上没有白炽灯泡、荧光灯的缺点，与它们比较，如表 2-3 所示。

表 2-3 白光 LED 与现行照明设备的比较

照明方式	优 点	缺 点
白炽钨丝灯	价格极低	低效率、高耗电、寿命短、易碎
荧光灯	价格低	省电、易碎、废弃物有汞污染
白光 LED	发热量低、耗电量少、寿命长、反应速度快、体积小、可平面封装、易开发成轻薄短小产品，环保	价格贵

目前，若以每年白光 LED 发光效率平均成长 60%的速度开发下去，要达到大型化、低价化、使用寿命长的照明用光源是不成问题的。

与直流 (DC) LED 灯相比，交流 (AC) LED 灯具有更节能省电、更长寿、更有能效的高性价比。因为 AC LED 发光省去了 AC/DC 转换器和恒流源。而这种交直流转换器是一种随着时间会老化、坏掉的电子元器件，其寿命比 LED 光源本身更短。但 AC LED 光源效率还没有 DC LED 高，并应避免金属片的裸露，而应是间接地把热带走，现已发展新的充液 LED 照明灯具。

3. 白光 LED 光源在安防中的应用

由上可知，由于环保白光 LED 的独特优点，尤其是节能环保与寿命长等，它必将代替传统光源，而用于安防视频监控场景的照明。

2.3.2 高效节能平面分布式 OLED 固态光源及其在安防中应用

OLED 灯与 LED 点光源不同，它是新发展起来的一种高效节能的平面分布式光源。它的优点是：制造成本与维护价格低、能耗与工作电压低而比较安全、高质量的光输出仅有少量的紫外光和红外光辐射、没有灯丝断裂而耐用、寿命长等。预计到 2020 年，这种固态光源比现有照明技术产生的同样光输出，可节省能源 50%，这意味着可减少能耗，因而较少产生空气和水的污染，从而可开发许多新的应用领域。

1. OLED 灯的结构与原理

OLED 灯的结构组成如图 2-11 所示。它是由多层薄膜器件组成，即由箔、膜、刚性或柔性的板作为基底，由电极层、活性材料层及保护阻挡层等组成，要求其中至少一个电极对光透明。当电极加 5~20 V 电压时，因活性层很薄 (1~100 nm)，其场强高达 105~107 V/cm (几乎接近击穿场强)，它促使电荷通过电极和活性层的界面注入。空穴从透明阳极注入，电子从阴极注入。注入电荷以彼此相反的方向迁移，最终相遇而结合。在结合时，释放能量并使再结合的分子或聚合物分段达到激发态。受激电子可以从一个分子迁移到另一分子，最后某些分子或聚合物分段以光子或热的形式释放，并希望所有超额的激发能作为光的方式释放。

近来，发射红光和绿光的磷光型 OLED (PHOLED) 的内量子效率几乎达到 100%，外量子效率达到 19% (在实验条件下转换成 40 lm/W)，表明整个荧光系统的量子剧增。有时，在低至 2.4 V 启动电压时，电流开始流动，并且有足够的空穴-电子对再结合，产生肉眼可见的光，

而电流和相当的光强，随驱动电压的增加而增强。

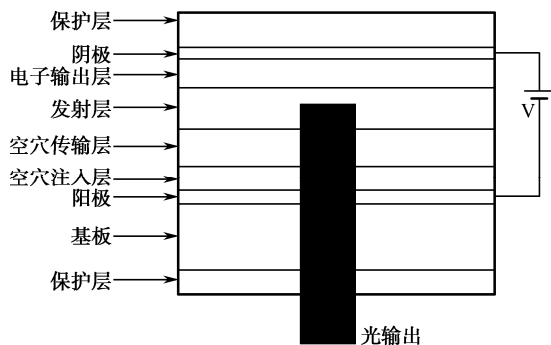


图 2-11 OLED 器件典型结构

2. OLED 灯的特点及与现有光源的比较

(1) OLED 灯的特点如下。

- 不是点光源，而是质量轻、超薄、柔软、明亮、少阴影的分布式（散布式）平面固体光源；
- 能耗低、工作电压低（3~5 V），使用与维护安全；
- 能效高、寿命长，耐用；
- 环保，无污染，不发热，仅有少量紫外与红外辐射；
- 可沉积到玻璃、陶瓷、金属、薄塑料板、织物等柔软和相适应的任何衬底，能做成任意形状和式样，能调节发光灯任何想要的颜色及任意色的深浅和强度，包括白光；
- 具有良好的色坐标、实现接近 100 的高彩色重现指数（CRI），能调节白光从冷色到暖色；
- 是电流驱动型器件，亮度可以在大于 10 000 cd/m² 的动态范围内变化，且均匀发光、不闪烁；
- 较少的插入元器件，能大规模、大面积、低成本制造等。

(2) OLED 灯与现有光源的比较。OLED 灯与现有光源的定性比较如表 2-4 所示。

表 2-4 OLED 灯与现有光源的定性比较

型式	效率	寿命	CRI	闪耀	造价	运用价	环境友好性
白炽灯	低	短	好	有	低	高	好
荧光灯	较高	长	较好	有	较高	较低	差
HID	较高	长	差	有	较低	较低	差
OLED 灯	高	长	好	无	低	低	好

目前，OLED 的发光效率已达到 30 lm/W，超过了白炽灯的水平，且绿光已达到 110 lm/W。2005 年初，日本 IMES 公司展出了 28×28 cm² 的 OLED 照明光源，其亮度已达到 400 cd/m²。后来，美国 UDC 公司又研制成 6×6 in² 的荧光 OLED 板，其显色指数大于 80，在色温 4 000 K 时发光效率达到 30 lm/W，在 2 900 K 时则为 15~20 lm/W。

值得指出的是，生产 OLED 的设备可以沿用液晶生产线，而且光源材料可用地球上丰富而又廉价的材料制成，并取之不尽、用之不竭，又节电、又环保。它不像 LED 的原材料（如镓、

铟)是地球上的稀有元素,并且还要提纯到99.9999%才能使用,其制造设备昂贵、工艺复杂,以致价格偏高而影响白光LED灯照明的广泛应用。尤其OLED灯是面光源,可以弯曲、折叠,从而可使照明设计变得随心所欲。因此,OLED灯将是一种价廉物美的理想的照明光源。

3. OLED 固态光源及其在安防中的应用

由于OLED灯是一种价廉物美的理想的照明光源,尤其是其节能环保与平面分布式,发光均匀柔和,因而将更适用于安防视频监控场景的照明,显然,未来将会广泛应用。

2.4 激光器及其在安防中的应用

激光器是一种新型的发光器件,和前述的常见光源相比,有方向性强、单色性好、相干性好、亮度高等突出优点,因而应用广泛。

2.4.1 激光器概述

1. 激光的基本特征

所谓激光,是指由原子(离子、分子等)系统受激辐射光放大形成的一种光子简并度很高的光辐射。所谓光子简并度,即某个状态(模式)中所具有的平均光子数,就称为该状态的光子简并度。对激光含义的这种表述,明确了:

(1) 激光产生的物理机理是受激辐射(受激辐射放大);

(2) 不是一有受激辐射放大的光辐射就是激光,该受激辐射放大过程必须使光辐射的光子简并度达到足够高的值。

激光的最为基本的特性是:其光辐射能量在量子状态(模式)上的高度集中性,即高光子简并度。由于激光具有高光子简并度这一基本特性,因而

- 反映在空间,显示出了好的方向性与空间相干性;
- 反映在频域,显示出了好的单色性与时间相干性;
- 反映在时域,显示出了好的超短性;
- 反映在能量的可集中性上,显示出了很高的单色亮度。

由上述可知,高光子简并度才是激光最为基本的特性,而好的方向性、好的单色性、好的空间与时间相干性等仅是高光子简并度这一基本特性在不同方面的反应。这是因为光束的方向性、单色性、空间与时间相干性等,都可以通过一个适当的普通光学系统加以提高,但无法通过一个普通的光学系统提高光束的光子简并度。

为了能对激光的高光子简并度这一基本特性有更深刻的理解,我们将激光与原子能技术做一对比:原子能,作为一种新型能源,与相同的普通能源(如煤)相比,其所释放的能量可以有成亿倍的提高;激光作为一种新型光源,与相同功率的普通光源(如电灯)相比,其所发射的光能量并不能提高,而是光能量在状态(模式)上有了成亿倍的集中,也就是其光子简并度(单色亮度)可以有成亿倍的提高。

因此,激光的出现,其重要的应用意义在于:

(1) 使信息技术从无线电波段全面推进到了光频波段。因为光是信息的重要载体,通过激光实现了 10^{12} b/s 量级的极大信息容量, 10^{12} b/s 量级的极快运算速度, 10^{12} b/cm³ 量级的极高存储密度,从而使我们进入了新的光信息时代。

(2) 实现了光能量在空间、频率及时间上的高度集中,使光的亮度有了成亿倍的提高。因为光也是能量的重要载体,通过激光实现了 10^{22} W/cm² 量级的极高功率、 10^{14} Pa 量级的极高压强、 10^{-16} s 量级的极短脉冲与极快可分辨过程、 10^{12} K 量级的极高温度与 10^{-10} K 量级的极低温度、 10^{-8} nm 量级的极窄频宽与极精密测量、 10^{-8} m 量级的极小可聚焦光斑与极精密加工。因此,激光在工业、农业、商业、医疗卫生、文化教育及高技术研究等领域开辟了一系列重要的应用。

2. 激光的产生

(1) 受激辐射。图 2-12 表示了在原子的两个能级之间产生跃迁的吸收、自发发射和受激辐射

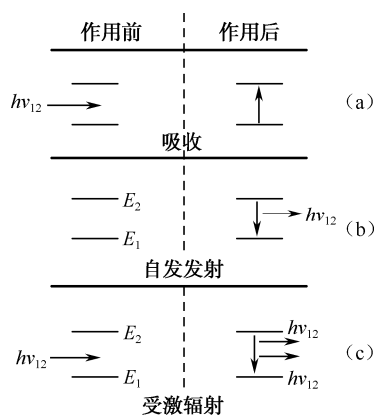


图 2-12 能级间跃迁的基本过程

辐射的三个基本过程。设 E_1 为基态, E_2 为激发态。这二能态之间的任何跃迁都伴随着发射或吸收频率为 ν_{12} 、取决于两能态之间的能量差,即 $h\nu_{12}=E_2-E_1$ 。常温下大部分原子处于基态,如果能量正好等于 $h\nu_{12}$ 的光子碰击此系统时,处于能态 E_1 上的原子会吸收光子而进入激发态 E_2 ,这就是吸收过程,如图 2-12 (a) 所示。原子在激发态是不稳定的,在没有任何外界刺激的条件下,有自发返回基态的趋势,并放出能量为 $h\nu_{12}$ 的光子。这种原子从高能态自发地返回到低能态的过程称为自发发射(或自发辐射),如图 2-12 (b) 所示。自发发射的特点是,每个原子的跃迁都是自发地独立进行,它们彼此毫无关系,因而发出是杂乱无章的非相干光。自发发射的寿命也就是原子处在激发态的平均时间,一般为 $10^{-9} \sim 10^{-3}$ s,寿命的长短取决于半导体参量,如禁带宽度(直接的或间接的)及复合中心的密度。另一种跃迁过程是,当能量为 $h\nu_{12}$ 的入射光子激励已处于激发态的原子后,原子因受激而跃回基态,并发射出频率、相位和方向都与入射光子相同的能量为 $h\nu_{12}$ 的光子。这种过程称为受激辐射(或称为感生辐射),如图 2-12 (c) 所示。

在激光物质中,外来的光子 $h\nu_{12}$ 可以引起激发态原子的受激辐射,但也可能被基态原子所吸收,这两个过程是同时存在的,且受激辐射与吸收的概率可能具有相同的数量级。在常温下,基态原子比激发态原子多得多,故总吸收多于总发射。要产生激光,必须使总发射大于总吸收。因此,产生激光的必要条件之一是受激辐射占主导地位。

(2) 分布反转(粒子数反转)。要使激光工作物质的受激辐射占优势,就必须从外部给工作物质输入能量,如光激励或正向 PN 结注入等,使处于激发态的载流子多于处于基态的载流子,也就是把载流子的正常分布倒转过来,称为分布反转状态(粒子数反转)。因此,分布反转是使受激辐射从次要地位转化为主导地位的必要条件。

使激光物质产生分布反转的方法很多,如固体激光器多采用光谱适当的强光灯对激光物质进行照射;气体激光器多采用使气体电离的方法;而半导体激光器多采用注入载流子的方法,使处于基态的原子跃迁到激发态,并随着受激辐射的损耗,不断地补充高能原子。

(3) 共振腔。激光物质发生分布反转后,尽管有增益作用,但还不足以产生激光。为使发

射光束具有激光的特点,还必须产生“振荡”。产生振荡的方法是在激光物质的两侧放置相互平行的反射面,这种反射面组称为共振腔。自发发射的方向不与共振腔轴线平行的光子将被反射出腔外,只有与轴线平行的自发发射光子才能促使形成受激辐射。也就是说,这些与腔轴平行的光子在腔内两个反射面上来回反射,反复地通过工作物质。依靠受激辐射,光子每通过一次工作物质便得到一次增益,使光子数不断增长。所以,共振腔是产生激光的又一必要条件。

受激辐射的光子在共振腔中来回多次反射的过程中,将因散射、透射、吸收等原因而受到损耗。如果光子在腔内来回一次所感生出来的光子数比损耗掉的多得多,即腔内增益超过损耗,便可产生激光振荡。同时,光在两反射面之间来回反射形成了两列相反方向传播的波,只有这两列波叠加而在腔内形成驻波时,这种振荡才是稳定的。也就是说,产生稳定振荡的条件是共振腔的长度 L 恰好等于辐射光半波长的整数倍,即

$$L = m \frac{\lambda}{2n} \quad (2-14)$$

式中, n 为与波长 λ 对应的介质折射率; m 为正整数(即为纵模指数)。对不同的 m 值,将有不同波长的驻波相对应。通常我们将在共振腔内沿腔轴方向形成的各种可能的驻波称为共振腔的纵模,如图 2-13 所示。

此外由式(2-14)可知,谐振波长由有效折射率 n 和腔长 L 决定。因此,通过改变温度或者注入电流使折射率 n 发生改变,即可使得激光波长调谐到另一波长,于是就可得到可调谐的激光器;同样,也可通过电学、机械或微机电(MEMS)等手段来改变腔长 L ,也可实现激光器的波长可调谐性。

由于 $\lambda=c/v$, 式(2-14)还可改写成

$$\nu = \frac{mc}{2nL} \quad (2-15)$$

式中, ν 称为共振腔的共振频率或纵模频率。由此可以说明,共振腔只对共振频率有选择增益作用。

综上所述,要得到激光必须满足三个基本要求:

- 要把处于较低能态的电子激发或泵浦到较高能态上去,为此需要泵源;
- 要有大量粒子分布反转,使受激辐射足以克服损耗;
- 要有一个共振腔提供正反馈及增益,用以维持受激辐射的持续振荡。

3. 固、气、液体激光器

(1) 气体激光器。气体激光器的工作物质是气体或金属蒸气,通过气体放电产生激励,实现粒子数反转。它的种类很多,波长覆盖了从紫外到远红外整个光谱区,目前已向两端扩展到 X 射线和毫米波段。由于气体工作物质均匀性好,输出光束的质量相当高,其单色性和方向性一般优于固体和半导体激光器,是很好的相干光源。典型的气体激光器主要有如下三种。

① 氦氖(He-Ne)激光器。工作物质是氦氖混合气,它利用气体电离的方法使粒子数反转,是一种原子气体激光器。它在激光器电极上,施加几千伏电压使气体放电。首先使氦电离,然后利用氦气电离时产生的电子去电离氖气。氦氖激光器能够发出三种波长的谱线(即 $0.6328 \mu\text{m}$ 、 $1.15 \mu\text{m}$ 、 $3.39 \mu\text{m}$),其中最常用的是橘红色($\lambda=0.6328 \mu\text{m}$)的激光。

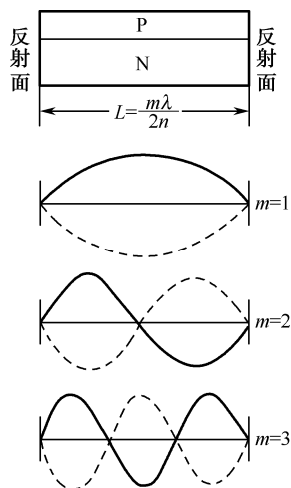


图 2-13 共振腔中的驻波

氦氖激光器具有如下优点。

- 单色性好, 单模稳频氦氖激光器的谱线宽度只有 10^{-17} m, 颜色非常纯 (波长稳定度为 10^{-6} 左右), 相干长度达几十 km;
- 方向性强, 光束发散角很小, 只有几毫弧度, 激光束几乎是一条直线;
- 结构简单、紧凑, 稳定性好;
- 造价低廉, 使用方便。因此, 它主要用于精密计量、全息术、准直测量等场合。

氦氖激光器以直流电源驱动, 输出光功率可达 0.3~1.5 mW 以上。它从结构上可分为全外腔、全内腔和半内腔三种形式。

- 全外腔激光器的放电管与腔反射镜完全分开, 窗口密封镜片形成布儒斯特窗。全外腔激光器的优点是: 输出线偏振光; 反射镜可以随时调整, 适于多种实验要求; 受温度影响较小等。全外腔激光器的缺点是, 经常需要调整, 而调整技术又比较复杂, 因而使用不便。
- 全内腔激光器的反射镜与放电管密封在一起, 因此使用时不需调整谐振腔, 用起来比较方便, 但腔管受温度影响较大, 输出不稳定。
- 半内腔激光器是一块反射镜与放电管固定一起, 另一块反射镜则和放电管分开。它具有上述两种激光器的优点。

② 氩离子 (Ar^+) 激光器。工作物质是氩气, 在低气压大电流下工作, 因而激光管的结构及其材料都与 He-Ne 激光器不同。连续的氩离子激光在大电流的条件下运转, 放电管需承受高温和离子的轰击, 因此小功率放电管常用耐高温的熔石英做成, 大功率放电管用高导热系数的石墨或 BeO 陶瓷做成。在放电管的抽向上加一均匀的磁场, 使放电离子约束在放电管轴向附近。放电管外部通常用水冷却, 以降低工作温度。

该激光器的输出谱线属于离子光谱线, 主要波长有 452.9 nm、476.5 nm、488.0 nm、496.5 nm、514.5 nm。其中, 488.0 nm 和 514.5 nm 两条谱线为最强, 约占总输出功率的 80%。

③ 二氧化碳 (CO_2) 激光器。工作物质是二氧化碳, 掺入少量的 N_2 和 He 等气体, 是典型的分子气体激光器。激光器输出谱线波长分布在 9~11 μm 的红外区域, 典型的波长为 10.6 μm 。激光器的激励方式通常有低气压纵向激励和横向激励两种。低气压纵向激励激光器的结构与 He-Ne 激光器类似, 但要求放电管外侧通水冷却, 是气体激光器中连续输出功率最大和转换效率最高的一种器件, 输出功率从数十瓦至数千瓦。横向激励激光器可分为大气压横向激励和横流横向连续激励两种, 其中大气压横向激励激光器是以脉冲放电方式工作的, 输出能量大, 峰值功率可达千兆瓦的数量级, 脉冲宽度为 2~3 μm , 而横流横向连续激励激光器则可以获得几万瓦的输出功率。

二氧化碳激光器广泛应用于金属材料的切割、热处理、宝石加工和手术治疗等方面。

(2) 固体激光器。固体激光器即激光工作物质是固体的激光器, 具有输出能量大、峰值功率高、器件结构紧凑、便于与光纤耦合、使用寿命长、单元技术成熟与体积较气体激光器小等优点。它现在用于测量吸收光谱, 如测量由污染物产生的瑞利和喇曼散射光谱, 用于超长距离的测量, 如人造卫星测距、地球到月球的测距等。固体激光器的主要缺陷是常用惰性气体放电灯泵浦效率低、热效应严重, 从而限制了输出功率的进一步提高和光束质量的改善。常见有以下几种。

① 红宝石激光器。它是发现最早、用途最广的晶体激光器。粉红色的红宝石是掺有 0.05% 铬离子 (Cr^{3+}) 的氧化铝 (Al_2O_3) 单晶体。红宝石被磨成圆柱形的棒, 棒的外表面经粗磨后可

吸收激励光。棒的两个端面研磨后再抛光,使两个端面相互平行,并垂直于棒的轴线,再镀以多层介质膜,构成两面反射镜。其中,激光输出窗口为部分反射镜,其反射比约为 0.9,另一个则为高反射比镜面。此外,作为激光器的激励源的脉冲氙灯安置与红宝石棒平行,它们两者分别位于内表面镀铝的椭圆柱体谐振腔的两个焦点上。脉冲氙灯的瞬时强烈闪光,借助于聚光镜腔体会聚到红宝石棒上,这样红宝石激光器就输出波长为 694.3 nm 的脉冲红光。它采用调 Q 工作方式,脉冲宽度为几毫秒量级,输出能量可达 1~100 J,广泛用于激光测距与测速等系统中。20 世纪 60 年代作者参与完成的人造卫星激光测距仪就是使用的这种激光器。

② 玻璃激光器。常用钕玻璃作为工作物质,它在闪光氙灯的照射下,在 1.06 μm 波长附近发射出很强的激光。钕玻璃的光学均匀性好,易做成大尺寸的工作物质,因而可用它做成大功率或大能量的固体激光器。

目前,利用掺铒(Er)玻璃制成的激光器,可产生对人眼安全的 1.54 μm 的激光。

③ YAG 激光器。它是以钇铝石榴石为基质的激光器,随着掺杂的不同,可发出不同波长的激光。最常用的是掺钕(Nd)YAG,它可在脉冲或连续泵浦条件下产生激光,波长约为 1.064 μm 。其他还有:掺铒的 YAG,发出 1.7 μm 的激光;掺钬(Ho)的 YAG,发出 2.1 μm 的激光;掺钕铒的 YAG,它发出 1.06 μm 和 2.9 μm 双波长的激光;掺铬(Cr)铱(Ir)钽的 YAG,发出 2 μm 的激光;掺铈(Tm)铒的 YAG,发出 2.69 μm 的激光等。

(3) 液体激光器。即工作物质为液体的激光器。它具有输出激光谱线宽、光束发散角小、激光输出波长可移动(可调谐)、某两种液体混合可输出新波长、激活离子密度大、增益系数高、能量转换效率高(可通过流体散热)、输出功率较高、光学均匀性好、冷却方便、价格较便宜等优点。但液体激光器本身用起来极为不方便,需要困难的手工操作和闭环泵浦,以避免热效应使激光器的特性遭到破坏,而且可以致癌,因而应用较少。

液体激光器常用的典型代表是染料激光器,它以染料为工作物质。将染料溶解于某种有机溶液中,在一种特定波长光的激发下,能发射一定带宽的荧光。某些染料,当在脉冲氙灯或其他激光的强光照射下,可成为具有放大特性的激活介质。用染料激活介质做成的激光器,在其谐振腔内放入色散元件,通过调谐色散元件的色散范围,可获得不同的输出波长,因而称为可调谐染料激光器。它在激光光谱学、激光化学、同位素分离等科研领域具有重要的应用价值。在激光医学上,其 577 nm 波长可用来治疗血红癌(血斑);630 nm 波长可用来做血卟啉光动力学治疗;在激光娱乐、表演方面,它可以方便地提供绿光、黄光、红光等光源。

若采用不同的染料溶液和激励光,染料激光器输出波长范围为 320~1000 nm。染料激光器有连续和脉冲两种工作方式,连续工作方式输出稳定,线宽小,功率大于 1 W;而脉冲工作方式的输出功率高,脉冲输出能量可达 120 mJ。

2.4.2 半导体激光器

1. 半导体激光器的特点与分类

半导体激光器是以半导体材料作为工作物质的激光器。它的工作物质有二元化合物(如 GaAs、CdS)、三元化合物(如 GaAlAs、PbSnTe)、四元化合物(如 GaInAsP)等。激励方式有 PN 结注入电流激励、电子束激励、光激励、碰撞电离激励四种。其中,第一种

激励方式的半导体激光器即激光二极管 (Laser Diode, LD), 是目前技术最成熟、应用最广泛的器件。

LD 通过受激辐射发光, 是一种阈值器件。LD 不仅能产生高功率 ($\geq 10\text{ mW}$) 辐射, 而且输出光发散角窄, 与单模光纤的耦合效率高 (30%~50%), 辐射光谱线窄 ($\Delta\lambda=0.1\sim 1.0\text{ nm}$), 适用于高比特工作, 载流子复合寿命短, 能进行高速 ($>20\text{ GHz}$) 直接调制, 非常适合于作高速长距离光纤通信系统的光源。

自 1970 年, 半导体激光器实现了室温下连续工作, 1975 年前后先后用于光盘机和光纤通信。此后, 由于应用的驱动, 人们对如何加强增益介质中电子与光子的相互作用、强化对电子和光子的限制等方面进行研究并取得了成功。在半导体激光器的增益介质方面, 由所谓体材料发展到量子阱 (QW) 和正在研究的量子线及量子点, 并由晶格匹配材料发展到应变材料; 在激光器的谐振腔构建方面, 由最初的普通法布里-珀罗 (F-P) 腔, 发展到具有波长选择的分布反馈 (DFB)、分布布拉格反射 (DBR)、垂直腔、微腔及光栅外腔。这些手段使得激光器的阈值电流密度不断降低, 激光线宽不断减少、转换效率等性能不断提高。

(1) 半导体激光器的特点。半导体激光器具有如下的特点。

① 体积最小, 其产生激光的核心部分 (芯片) 各维的线度都在微米量级, 封装后的体积最大也仅有火柴盒大小。

② 质量最轻, 一般在数十克。

③ 直接电注入产生激光, 因此它是高效率的电子-光子转换器。理论上, 内量子效率可达 100%。实际上, 由于增益介质中不可避免地存在注入电子和产生光子的损耗, 但其功率效率也能达 30% 以上, 是所有激光器中效率最高的。

④ 工作寿命最长, 一般小功率半导体激光器的工作寿命能达数十万乃至百万小时。大功率半导体激光器也能连续工作数万小时。

⑤ 覆盖的波长范围最广。目前已能从不同的半导体材料中获得从紫外 (约 300 nm) 到红外 (十几微米) 的一个很宽的激光频谱范围。

⑥ 结构最简单, 一般的 F-P 腔半导体激光器, 其腔面由晶体的自然解理面构成。分布反馈和分布布拉格反射结构也可在材料生长过程中一气呵成。驱动电流也直接加到芯片上。

⑦ 价格最便宜, 与其他激光器相比, 半导体激光器的价格最低。以小功率 (约 10 mW) 的半导体激光器为例, 每个仅数美元。

⑧ 能方便地与光纤高效率耦合。由于其近场尺寸很小 (微米量级), 无须另加透镜等聚焦系统就可以与经微透镜处理的光纤直接高效耦合, 其耦合损耗在 3 dB 以下。这对包括光纤通信在内的许多应用均是重要的。

⑨ 具有直接调制的能力, 能直接将电信号加于半导体激光器上得到所需的不失真的光信号。这无疑对包括光通信工程、光信息存储在内的光电子信息领域是非常重要的, 也是半导体激光器独具优点之一。

⑩ 有与其他半导体光子器件或电子器件单片集成的能力。

正是由于上述一些独特的优点, 半导体激光器的应用最广, 如在国民经济的各个领域、国防建设的诸多重要方面都获得了广泛应用。

(2) 半导体激光器的分类。半导体激光器的分类如图 2-14 (a), 作为它的重要组成部分的谐振腔和增益介质的分类, 分别表示于图 2-14 (b) 和图 2-14 (c)。

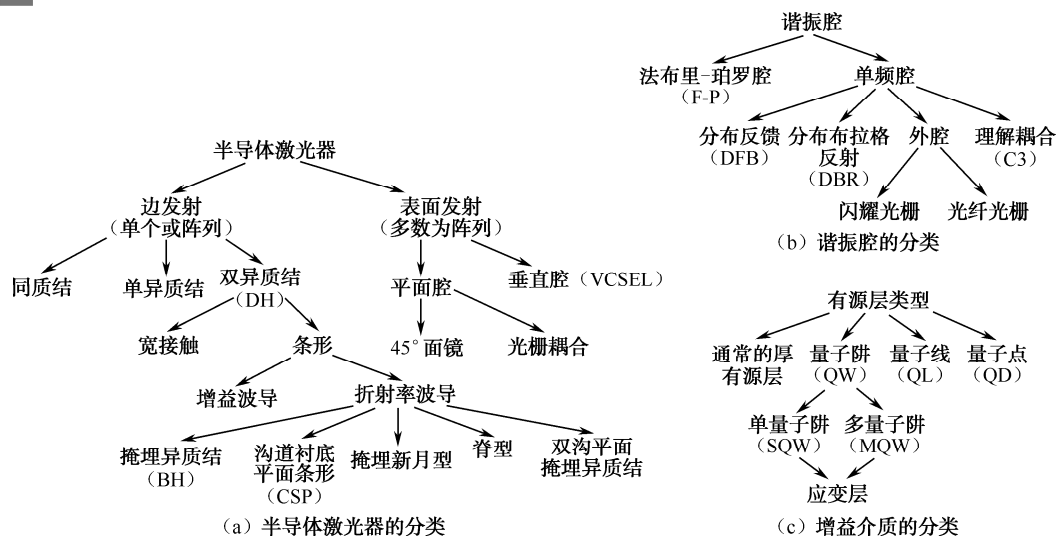


图 2-14 半导体激光器及谐振腔和增益介质的分类

2. 半导体激光器的主要特性参数

(1) LD 的阈值与 $P-I$ 特性。在激光器中, 要维持激光振荡, 不仅需要使光子的产生速率超过吸收速率, 而且还要超过光子在结区的损耗率, 这种刚好抵偿吸收与损耗的光子产生率处就是阈值。也就是说, 阈值是半导体激光器内部增益与损耗 (内部损耗和输出损耗) 之间的平衡点。阈值之后的半导体激光器才开始有净增益。半导体激光器是直接注入电流产生辐射跃迁, 最终得到激光输出, 故它的阈值是以电流密度 J 或电流 I 来表示的。

对所有应用来说, 总是希望阈值越小越好, 图 2-15 示出了影响阈值的有关因素。

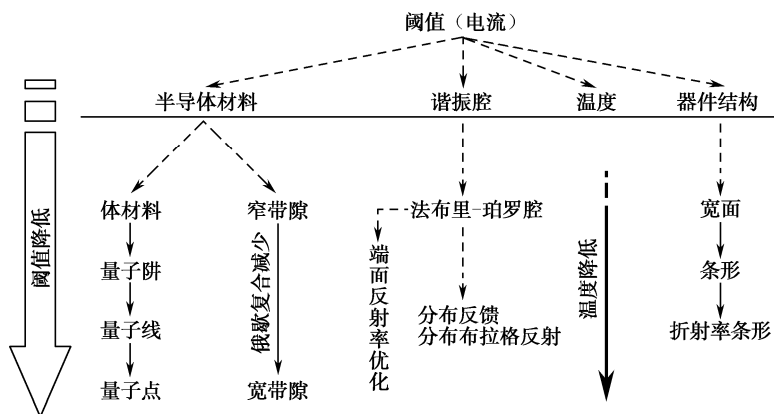


图 2-15 影响半导体激光器阈值的有关因素

LD 的 $P-I$ 特性曲线如图 2-16 所示。LD 有一阈值电流 I_{th} , 当 $I > I_{th}$ 时, LD 才发出激光; 在 I_{th} 以上, 光功率 P 随 I 线性增加。阈值电流是评定半导体激光器性能的一个主要参数, 利用两段直线拟合法可对其进行测定。如图 2-17 所示, 将阈值前与后的两段直线分别延长并相交, 其交点所对应的电流即为阈值电流 I_{th} 。

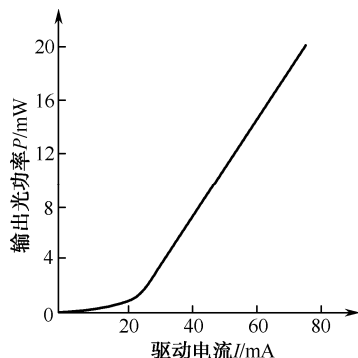
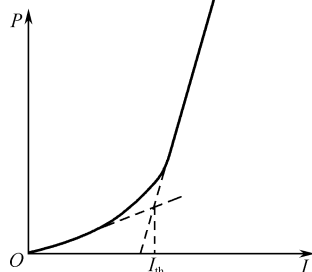
图 2-16 LD 的 P - I 特性曲线

图 2-17 两段直线拟合测量阈值

(2) LD 的光谱特性。激光二极管的发射光谱取决于激光器光腔的特定参数，大多数常规的增益或折射率导引器件具有多个峰的光谱，如图 2-18 所示。激光二极管的波长可以定义为它的光谱的统计加权。在规定输出光功率时，光谱内若干发射模式中最大强度的光谱波长被定义为峰值波长 λ_p ，对诸如 DFB、DBR 型 LD 来说，它的 λ_p 相当明显。一个激光二极管能够维持的光谱线数目取决于光腔的结构和工作电流。

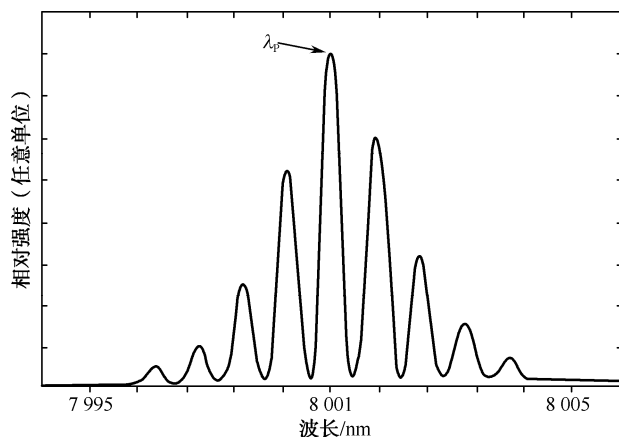


图 2-18 LD 的光谱特性曲线

(3) LD 的效率。

① 功率转换效率。激光器输出的光功率与激光器所消耗的电功率之比，即器件消耗单位电功率的输出光功率为

$$\eta_p = \frac{P_{\text{out}}}{IU + I^2 r_s} = \frac{P_{\text{out}}}{\frac{IE_g}{e} + I^2 r_s} \quad (2-16)$$

式中， η_p 是一个重要参量。低的阈值电流 I_{th} 和相应低的工作电流 I 、低的串联电阻（特别是低的欧姆接触电阻） r_s 都有助于提高 η_p 。

由式 (2-16) 也可看出，在半导体激光器上所加的电压约为 $E_g + Ir_s$ 。如 $E_g = 1.42 \text{ eV}$ 为有源层，所加电压约为 $1.42 \text{ V} + Ir_s$ ，因此加载于半导体激光器的直流电压只有数伏特。

② 外微分量子效率。外微分量子效率定义为

$$\eta_d = \frac{d(P_{\text{out}} / h\nu)}{d[(I - I_{\text{th}}) / e]} = \frac{e}{h\nu} \frac{dP_{\text{out}}}{d(I - I_{\text{th}})} \quad (2-17)$$

对于泵浦的半导体激光器， η_d 是最重要的参量。由于电子注入速率增加而引起输出光子速率增加的线性范围是有限的，注入电流超过某一值后，激光器的增益处于饱和，同时最大输出功率受到热积累的限制。因热积累使结温升高，使热载流子泄漏增加，从而使 η_d 下降。

(4) LD 的调制特性。当在规定的直流正向工作电流下，对 LD 进行模拟信号电流调制，便可实现对输出光功率的调制。由于调制过程的损耗，相对直流的调制响应（度）随频率的增加而下降。

要想提高调制频率，可从下面几个方面着手。

- 提高微分增益；
- 提高载流子由有源区到限制层的逸出时间；
- 提高光子密度（输出功率）；
- 降低载流子越过限制层的渡越时间；
- 降低增益抑制因子；
- 减小光子寿命；
- 减小器件尺寸；
- 减小器件寄生参量。

(5) LD 的模式。LD 的模式分为空间模和纵模（轴模）。空间模描述围绕输出光束轴线某处的光强分布，或者是空间几何位置上的光强（或光功率）的分布，也称为远场分布；纵模则表示一种频谱，它反映所发射的光束其功率在不同频率（或波长）分量上的分布。二者都可能是单模或者多个模式（多模）。边发射半导体激光器具有非圆对称的波导结构，而且在垂直于异质结平面方向（称为横向）和平行于结平面方向（称为侧向）有不同的波导结构和光场限制情况。横向上都是异质结构成的折射率波导，而在侧向目前多是折射率波导，但也可采取增益波导，因此半导体激光器的空间模式又有横模与侧模之分。图 2-19 表示这两种空间模式。

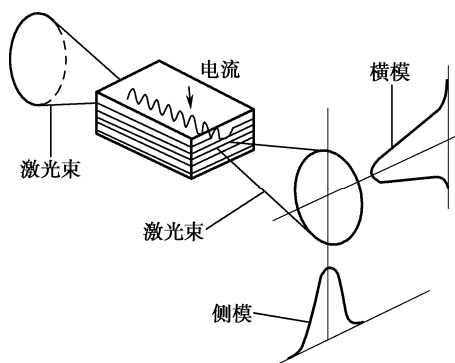


图 2-19 半导体激光器横模与侧模

由于有源层厚度很薄（约为 $0.15 \mu\text{m}$ ），因而能保证在单横模工作。而在侧向，则其宽度相对较宽，因而视其宽度可能出现多侧模。如果在这两个方向都能以单模（或称为基模）工作，则为理想的 TEM_{00} 模，此时出现光强峰值在光束中心且呈“单瓣”。这种光束的光束发散角最小、亮度最高，能与光纤有效耦合，也能通过简单的光学系统聚焦到较小的斑点，这对激光器的应用是非常有利的。相反，若有源区宽度较宽，则发光面上的光场（称为近场）在侧向表现

出多光丝,好像一些并行的发光丝,在远场的侧向则有对应的光强分布,如图 2-20 所示。这种多侧模的出现,以及它的不稳定性,易使激光器的 $P-I$ 特性曲线发生“扭折”,使 $P-I$ 曲线线性变坏,这对信号的模拟调制不利。同时,多侧模也影响与光纤高效率的耦合,侧模的不稳定性也影响出纤功率的稳定性,不能将这种多侧模的激光束聚焦成小的光斑。

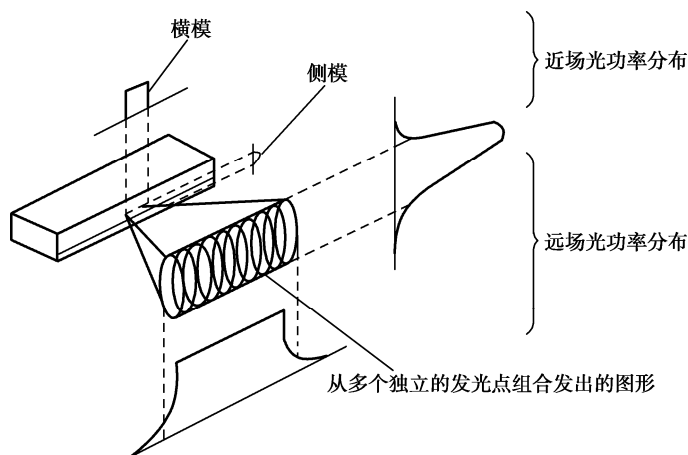


图 2-20 有多侧模的半导体激光器的近场和远场

由于 LD 发光区几何尺寸的不对称,其远场呈椭圆状,其长、短轴分别对应于横向与侧向。在许多应用中需用光学系统对这种非圆对称的远场光斑进行圆化处理,因此,半导体激光束的相干性较差。而垂直腔表面发射激光器 (VCSEL) 则可以发射出圆形光束。

3. 几种典型的半导体激光器

由半导体激光器的类型可知,其种类很多,不可能一一介绍,这里只介绍市面上常用的两种最基本的半导体激光器。其他的如量子阱、垂直腔表面发射激光器 (VCSEL)、微腔激光器 etc 可参阅本书参考文献[1, 2]。

(1) PN 结型二极管注入式激光器。结型激光器的结构如图 2-21 所示。激光器工作物质为 GaAs, 将工作物质制成 PN 结并切成长方块。为实现分布反转, 结区的两侧都要求是重掺杂半

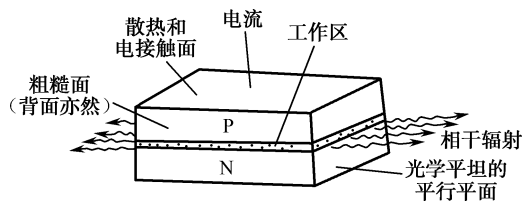


图 2-21 结型激光器的结构

导体材料, 杂质浓度一般为 $10^{18} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 使费米能级分别进入导带及价带内。图 2-21 中, 左右两侧是二极管的辐射输出端面。由一对相互平行的解理面或抛光面构成, 并与结平面垂直, 这对平面构成了端部反射器。其余的前后两面是粗糙的, 用来消除主要方向以外的激光作用。这种结构叫作法布里-珀罗共振腔。然后焊上引出线, 供给二极管的电流从引线流向散热器。结型激光器所用的半导体材料是重掺杂

半导体, 能带结构如图 2-22 所示, 平衡态时, P 区价带顶没有电子, N 区导带底有高的电子浓度。当 PN 结加上正向偏压后, 势垒降低, 能带结构变为图 2-22 (b) 所示, 外加电压 V 使 N 区和 P 区的费米能级分开, 并分别进入导带和价带内。由于势垒降低, 大量电子由 N 区越过势垒与 P 区的空穴复合, 发射出能量等于 $h\nu$ 的光子。空穴也可由 P 区流入 N 区与电子复合发

射光子。当外加电压足够大 ($qV \geq E_g$), 使 $h\nu \geq E_g$ 时, 在势垒区和它两侧一个扩散长度范围内, 将出现一个分布反转区, 这就是发射激光的工作区, 再加上端面反射反馈便会产生激光。

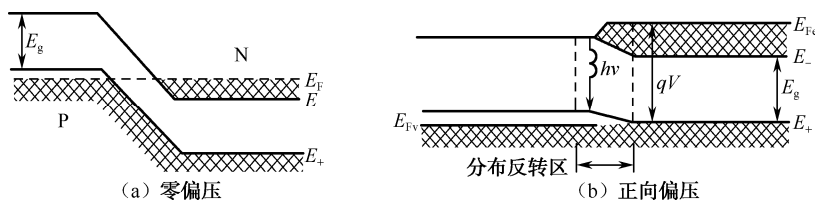


图 2-22 结型激光器能带图

结型半导体激光器的阈值电流都比较高。例如 GaAs 激光器, 在 $T=4.2\text{ K}$ 时, $I_{th}=130\text{ A/cm}^2$, 室温下 $I_{th}>10^6\text{ A/cm}^2$ 。由于激光器工作时需要的电流很大, 电流通过结和串联电阻时, 将使结的温度上升, 这又导致阈值电流上升, 因此, 这种激光器多在低温下使用。一般, 阈值电流很高的激光器, 通常用脉冲电流来激励, 以降低平均热损耗。

结型激光器的频谱分布取决于半导体材料, 如 GaAs 激光器的输出波长在 77 K 时为 840 nm , InP 在 30 K 时为 910 nm 。当温度升高时, 其受激辐射谱线将向长波方向移动。

(2) 异质结半导体激光器。由于 PN 结 (同质结) 激光器在室温下阈值电流很高, 不能实现室温下的连续振荡, 在很大程度上限制了它的应用。为了降低激光器在室温下的阈值电流, 实现室温下连续振荡, 在较窄禁带宽度材料的两侧加上较宽禁带宽度的材料构成异质结, 以限制载流子。由于这种限制作用, 增加了结区载流子浓度, 从而提高受激辐射的效率。

① 单异质结激光器。其结构如图 2-23 所示。在 GaAs 的 PN 结上, 用分子束外延或液相外延法得到 $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结。由于 GaAs 和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 禁带宽度不同, 因而在界面处形成了较高的势垒, 使从 N-GaAs 注入 P-GaAs 中的电子在继续向 P- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 扩散时受到阻碍, 同没有这种势垒存在时比较, P-GaAs 层内的电子浓度增大, 辐射复合的概率也就提高了。再者, P 型铝镓砷对来自 P 型 GaAs 的发光吸收系数小, 损耗也就小。由于铝镓砷的折射率较砷化镓低, 因而限制了光子进入铝镓砷区, 使光受到反射而局限在 P-GaAs 区内, 从而减少了周围非受激区对光的吸收。由于电子和光子在异质结面上都受到了限制, 减小了损耗, 因而降低了阈值。

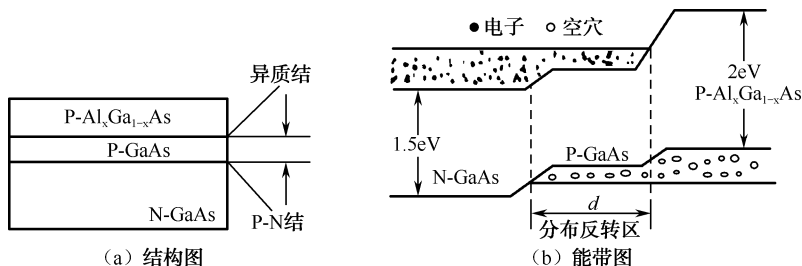


图 2-23 单异质结激光二极管

单异质结激光器在低温下阈值电流密度与同质结差不多, 但在温度变化时, 异质结激光器的阈值随温度的变化较小, 如室温下的阈值电流密度可降至 $8\,000\text{ A/cm}^2$, 但也只能实现室温下的脉冲振荡。为进一步降低阈值电流, 实现室温下的连续振荡, 研制了双异质结激光器。

② 双异质结激光器。其结构如图 2-24 所示, 在 GaAs 的一侧为 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, 另一侧

为 P 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 。作用区两侧具有对称性,因而激光作用区在 N 型或 P 型处皆可。以 P 型为例,加正向偏压时,电子注入作用区到达 P-GaAs 和 P- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 界面,受到势垒的阻挡而返回,不能进入 P 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层中去,从而增加了 P 型 GaAs 层中的电子浓度,提高了增益。又由于 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 与 P 型 GaAs 之间的势垒避免了单异质结激光器存在的空穴注入现象,使工作区电子、空穴浓度更大,复合概率增加。另外,由于两个界面处折射率都发生较大突变,所以光子被更有效地限制在作用区内,因此,双异质结激光器的阈值电流进一步降低到 $1\,000\sim 3\,000\text{ A/cm}^2$,实现了室温下的连续振荡。

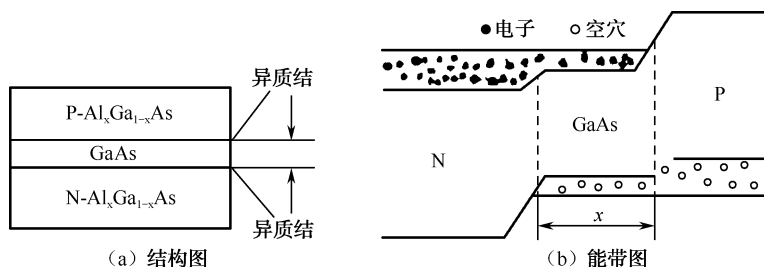


图 2-24 双异质结激光二极管

实验证明,阈值电流随温度的变化也较小。目前,异质结激光器的主要改进方向是进一步降低阈值电流密度和提高效率,以及获得与固体和气体激光器相近的光束相干性和方向性。另外,用其他半导体材料做成双异质结并扩展异质结激光器的光谱波段也是一个很重要的发展方向。

除上述半导体激光器外,还有量子激光器(量子阱、量子线、量子点激光器)、布拉格光栅激光器、垂直腔表面发射半导体激光器(Vertical Cavity Surface-Emitting Semiconductor Laser, VCSEL)、微腔激光器等。欲知详情,可参阅本书参考文献[1, 2, 3, 13]。

2.4.3 光纤激光器

由上述可知,半导体激光器有很多优点,因而应用非常广泛。但其缺点是:与光纤之间耦合困难,增大了腔内插入损耗,从而导致其效率低、阈值高,因此,光纤激光器才应运而生。目前,光纤激光器已被广泛地应用于 DWDM 光纤通信系统中。

1. 光纤激光器的结构和原理

光纤激光器是指以掺杂光纤为介质的激光器,它包括

- (1) 基质为光子晶体、石英玻璃、硅或氟化物玻璃,掺杂稀土元素,如 Nd(钕)、Er(铒)、Yb(镱)、Tm(铥)等 15 种元素的掺杂光纤激光器。
- (2) 向塑料光纤芯部或包层内溶入染料的染料光纤激光器。
- (3) 由光纤的非线性效应产生的相干受激散射(受激拉曼散射和受激布里渊散射)。

现以图 2-25 所示的纵向泵浦的光纤激光器为例,说明光纤激光器的基本原理。由图 2-25 可见,一段掺杂稀土金属离子的光纤被放置在两个反射率经过选择的腔镜之间,泵浦光从左面腔镜耦合进入光纤,左面腔镜对于泵浦光全部透射并对于激光全反射,以便有效地利用泵浦光,并防止泵浦光产生谐振而造成输出光不稳定。右面腔镜对于激光部分透过,以便形成激光束的

反馈和获得激光输出。这种结构实际上就是法布里-珀罗谐振腔结构, 泵浦波长上的光子被介质吸收, 形成粒子数反转, 最后在掺杂光纤介质中产生受激光发射, 而输出激光。

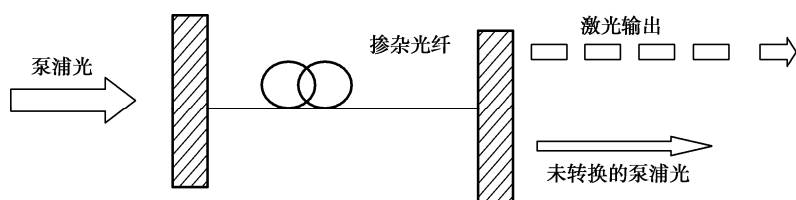


图 2-25 光纤激光器原理示意图

从效果上看, 光纤激光器是一种高效的波长转换器, 即由泵浦光波长转换为所掺杂稀土离子的激光波长。这个激光波长正是光纤激光器的输出光波长, 它不受泵浦波长的控制, 仅由基质材料的稀土掺杂元素决定。因此可以利用与稀土离子吸收光谱相对应的不同短波长、高功率且廉价的半导体激光器作为泵浦源, 以获得不同波长(处于光纤低损耗窗口的 $1.3\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$ 及 $2\sim 3\mu\text{m}$ 红外光波段)的激光输出。

2. 光纤激光器的特点

掺杂光纤激光器与其他激光器相比, 它具有一系列重要特点。

- (1) 耦合效率高, 因为其激光介质本身就是导波介质, 可方便、高效地与光纤传输系统连接, 这是基于光纤纤芯很细, 纤内易形成高功率密度的缘故。
- (2) 能量转换效率高, 如利用新型双包层光纤的光-光转换效率可达 80% 以上。
- (3) 激光阈值低, 其掺铒光纤的阈值仅 $\leq 5\text{ mW}$ 。
- (4) 波段调谐范围广, 可在 $380\sim 3900\text{ nm}$ 很宽的波段范围及多波长运行, 其色散性和稳定性好, 这是基于光纤的可选择性、可调谐参数多的特性。
- (5) 器件结构紧凑简单、小巧灵活, 可集成化, 还可借助光纤的极好柔韧性, 与方向耦合器等器件构成各种柔性谐振腔, 有利于光纤通信系统的应用。
- (6) 激光亮度高, 因光纤损耗小, 激光场主要约束在纤芯内, 能产生甚高亮度和甚高峰值功率。
- (7) 激光束质量及调谐性能好, 易实现单模、单频运转和超短脉冲输出。
- (8) 能在不施加强制冷的情况下连续工作, 因为光纤具有很高的“表面积/体积”比, 散热效果好。
- (9) 器件寿命长, 平均泵浦寿命 $(1\sim 10)\times 10^4\text{ h}$ 。
- (10) 工作条件不严格, 可自然冷却或简单风冷, 且耐高震动、高冲击, 可在高温与大烟尘下运行。

以上这些特点决定了光纤激光器比半导体激光器拥有更多的优势。

3. 光纤激光器的基本特性参量

光纤激光器是一种多波长的光源, 它和其他激光器结构类似, 也由增益介质、光学谐振腔和泵浦源三部分组成。增益介质能产生光子, 光学谐振腔能使光子得到反馈, 泵浦源能激励光子跃迁。掺杂光纤激光器的激活粒子是掺杂的稀土元素电离形成的 3 价离子, 如 Er^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Yb^{3+} 等。最常采用的泵浦源为 LD, 此外有钛宝石, YAG 等固体激光器。稀土类元素掺杂光纤

激光器的光纤基质材料应用最多的是玻璃(主要有硅玻璃和氟化物玻璃)与石英。对于硅玻璃,掺杂物质量份数为 10^{-6} 的数百倍,对于氟化物玻璃则可高一些。不同种类稀土离子的激光能级结构构成了不同的工作波长、激光运转方式和运转特点。依掺杂离子种类及浓度的不同,所用光纤长度的典型值在0.5~5 m之间。对掺 Er^{3+} 光纤,在三能级系统下运转, 10^{-6} 的数百倍,典型的长度约为1 m。而工作于四能级状态的掺 Nd^{3+} 光纤,腔内损耗较小,通过增加光纤长度可以降低阈值。表 2-5 给出了掺钕、铒、镱等光纤激光器的一些主要的相关特性参量。

表 2-5 掺钕、铒、镱等光纤激光器的一些主要的相关特性参量

激光器种类	吸收带/ μm	荧光带/ μm	泵浦源/ μm	输出波长与调谐范围/ μm	典型输出功率	主要应用领域
掺 Nd^{3+} 光纤	0.80,0.90	0.9, 1.06, 1.35	LD: 0.807; Ar^+ : 0.5145; YAG: 1.06; 钛宝石: 0.7~1	0.9,1.06,1.35 0.9~0.95 1.07~1.14		光纤通信、 传感
掺 Er^{3+} 光纤	0.5~0.6,0.63 0.8,0.98,1.5	1.55	倍频 YAG: 0.532 LD: 0.98,1.48	1.55	数 mW	光纤通信、 传感、光谱
掺 Yb^{3+} 光纤	800~1100	0.97~1.2	钛宝石: 0.86~0.98 LD: 0.915,0.98	0.976,1.064 1.083	数 kW	激光加工、 医疗
掺 Pr^{3+} 光纤				1.29~1.315	约 100 mW	
掺 Tm^{3+} 光纤			LD: 0.795,0.98 钛宝石: 1.06 YAG	1.455~1.505 1.7~2. 0.81	约 100mW 约 10W	光纤通信、 传感

典型的光纤激光器有;双包层光纤激光器、连续波光纤光栅激光器、多波长光纤激光器、高功率光纤激光器、超短脉冲光纤激光器(如调 Q、锁模、超连续谱光纤激光器)等。欲了解详情可参阅本书参考文献[1, 2]。

2.4.4 光子晶体与光子晶体光纤激光器

1. 光子晶体

光子晶体是 1987 年提出的,这种材料有一个显著的特点,即它可以如人所愿地控制光子的运动,是光电集成、光子集成、光通信、微波通信、空间光电技术,以及国防科技等现代高新技术的一种新概念和新材料,也是为相关学科发展和高新技术突破带来新机遇的关键性基础材料。光子晶体的这一概念是同真实晶体的类比而来的。在固体材料中,由于原子核周期性势场的作用,电子会形成能带结构,带与带之间(如价带与导带)有能隙,称为禁带。将这一思想应用于传输光的介质,如果介质中也存在周期性的结构,其中的光子也会形成类似于电子能带的结构,在带与带之间也会出现禁带。在固体中,能量处于禁带内的电子是不可能存在的。与此类似,在具有禁带的介质结构中,频率对应于禁带的光不能在其中存在或传播,把这种由于存在禁带而对频率有选择特性的周期性介质结构称为光子晶体,相应的光不能在其中存在或传播的频率范围称为光子禁带或光子带隙。

光子晶体的周期性结构可以抑制自发辐射,自发辐射的概率与光子所在频率的态密度成正比。当原子被放在一个光子晶体里面,而它自发辐射的光频率正好落在光子禁带中时,由于该频率的态密度为零,因而自发辐射概率为零,相应的自发辐射被抑制。而抑制自发辐射具有十分重要的现实意义,如在半导体激光器中,由于自发辐射的存在而引起较大的附加电流损失,这是成为激光器阈值的主要原因。如果能够把自发辐射限制在一定的电磁模式内,如激光器的输出模式内,则激光器的阈值会大幅度降低,甚至有可能制成零阈值激光器。在异质结双极晶体管,如果将表现为电子-空穴复合的自发辐射降至最少,那么晶体管的电流增益则会随之大大增强。

传统的激光器存在功耗大、阈值高、模式特性差、尺寸大、不易集成等缺点,而成为限制激光器被更广泛应用的瓶颈;光波导和反射镜已广泛应用于集成光路和光通信中,由于目前无法制备直角波导和高反射率的反射镜,同样限制了该器件的实际应用。但光子晶体具有特殊的控制光子的能力,在传统光电子器件中引入光子晶体结构,将突破传统器件中的物理瓶颈,而提升器件的性能;在光子晶体芯片上集成激光器、波导、滤波器、耦合器等,将能实现微纳结构下的全光集成。

随着微加工技术的进步,近十年来集成光路研究取得了很大的进展。但是,光子是中性粒子,不像电子一样易于被操纵,因而目前光信息技术的应用还仅仅局限于信息的传输,即光通信,而在信息处理方面还无法取代电子技术。但光子晶体这种新材料,可能为解决这一问题提供机会。因为可根据光子晶体的能带工程,来达到控制光子运动的目的。更为重要的是,可以在一块光子晶体上将具有不同功能的光子器件集成起来,实现光子集成芯片。显然,在这个芯片中,光子晶体激光器将作为核心器件而提供光子。

值得指出的是,光子晶体不是简单的晶体而是由不同晶体按特定方式排列而成的。目前,实验室中所用的光子晶体,都是人工设计制作出来的。

2. 光子晶体激光器

传统激光器有一些缺陷似乎很难克服,如激光器发射波长的变化使传输损耗发生变化;随功率的增加线宽趋于饱和,并重新展宽;辐射角比较大,耦合效率不高。而如果引入光子晶体结构对光子态的调控作用,即人为地制造出可以将光局限在其中的微腔,这样在光子带隙中就会出现一个或几个孤立的缺陷模,能够形成激光的振荡,使微腔中的激光介质被激发,从而就会产生具有缺陷模特征的激光。当微腔的 Q 值足够大时,缺陷模激光就会有很好的单色性,再以平面内波导或平面外其他方式将其引出光子晶体,就可以很好地控制方向。因此,光子晶体微腔,是一个特殊的谐振腔,它不仅保持腔内光场的振荡,同时也从物质本身本征地增强了这种振荡。由于自发辐射的能量几乎全部用来发射激光,这就大大降低了激光器的阈值。这种小体积、低阈值甚至零阈值、高功率、易于光纤耦合而且可以在小区域密集分布的激光器,正是光电信息系统所追求的信息光源。此外,光子晶体激光器本身还可以延伸到高灵敏的化学探测器设计中,并为探索许多基本的物理现象开辟新的方向。

1999年,美国加州理工大学的 Painter 等人设计制作出第一个光子晶体点缺陷腔型激光器。它结合了光子晶体的光量子调控与半导体量子阱材料受限电荷态的量子调控,利用微电子加工技术,在 InGaAsP/InP 量子阱材料上,实现了波长为 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 的激射。这种结构采用的是三角晶格光子晶体,三角晶格光子晶体的带隙比四方晶格的宽,因此相对而言,制作缺陷腔激光器较容易。

为使光子晶体激光器更加实用化,必须采用电注入的方式。2001年,密西根大学的 Bhattacharya 等人利用 DBR 作为底层,加强垂直方向上的光限制而设计了电注入光子晶体缺陷腔激光器。2004年年底,韩国先进工业技术研究院的 Lee Y 等人发表了更为合理的电注入光子晶体缺陷腔激光器的结构,它利用单缺陷腔下方的介质柱提供了一个导电通道,并充当一个导热的介质,从而解决了光子晶体激光器导热不佳的问题。

光子晶体内的缺陷不仅仅是去掉某些晶格点上的空气孔,还可以采用晶格错位的概念,在完整三角晶格中引入晶格位移,同样可以在禁带中获得缺陷态。

随着光子晶体微腔激光器研究的深入,由单一缺陷微腔发展到多个光子晶体微腔的耦合。2006年,美国斯坦福大学的 Vuckovic 研究小组首次报道了通过多个微腔耦合获得超快激光的研究成果,其激光器的调制速率超过 100 GHz (目前传统激光器的调制速率在 40 GHz 左右)。目前,贝尔实验室、英国巴斯大学、丹麦 Crystal Fiber A/S 公司等都在大力研究新型的光子晶体激光器。在我国,深圳市激光工程重点实验室也已经开发出了功率达 15 W 的光子晶体激光器。高效光子晶体激光发射器将逐步实用化,继而逐渐发展为激光器的主流。欲了解详情可参阅本书参考文献[1, 2]。

3. 光子晶体光纤激光器

(1) 光子晶体光纤。光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF), 又称为多孔光纤或微结构光纤, 以其独特的光学特性和灵活的设计成为近年来的热门研究课题。这类光纤是由在纤芯周围沿着轴向规则排列微小空气孔构成的, 通过这些微小空气孔对光的约束实现光的传导。独特的波导结构, 灵活的制作方法, 使得 PCF 与常规光纤相比具有许多奇异的特性, 有效地扩展和增加了光纤的应用领域。

① 光子晶体光纤的类型。按导光机理来说, PCF 可分为如下两类。

(a) 折射率导光机理。周期性缺陷的纤芯折射率 (石英玻璃) 和周期性包层折射率 (空气) 之间有一定差别, 从而使光能够在纤芯中传播, 这种结构的 PCF 导光机理依然是全内反射, 但与常规光纤有所不同, 由于包层包含空气, 所以这种机理称为改进的全内反射, 这是因为空芯 PCF 中的小孔尺寸比传导光的波长还小的缘故。

(b) 光子能隙导光机理。理论上求解光波在光子晶体中的本征方程可导出实心 and 空心 PCF 的传导条件, 即光子能隙导光理论。光纤中心为空心, 虽然空心折射率比包层石英玻璃低, 但仍能保证光不折射出去, 这是因为包层中的小孔点阵构成光子晶体。当小孔间距和小孔直径满足一定条件时, 其光子能隙范围内就能阻止相应光传播, 光被限制在中心空心之内传输。最近有研究表明, 这种 PCF 可传输 99 % 以上的光能, 而空间光衰减极低, 光纤衰减只有标准光纤的 $1/4 \sim 1/2$ 。

空心 PCF 光子能隙传光机理具体解释为: 在空心 PCF 中形成周期性的缺陷是空气, 传光机理是利用包层对一定波长的光形成光子能隙, 光波只能在空气芯形成的缺陷中存在和传播。虽然在空心 PCF 中不能发生全内反射, 包层中的小孔点阵结构起到反射镜的作用, 使光在许多小孔的空气和石英玻璃界面多次发生反射。

各种类型的光子晶体光纤如图 2-26 所示。

② 光子晶体光纤的特性。光子晶体光纤 PCF 有如下特点: 结构设计灵活, 具有各种各样的小孔结构; 纤芯和包层折射率差可以很大; 纤芯可以制成多种样式; 包层折射率是波长函数, 包层性能反映在波长尺度上。因此, PCF 具有如下的特性。

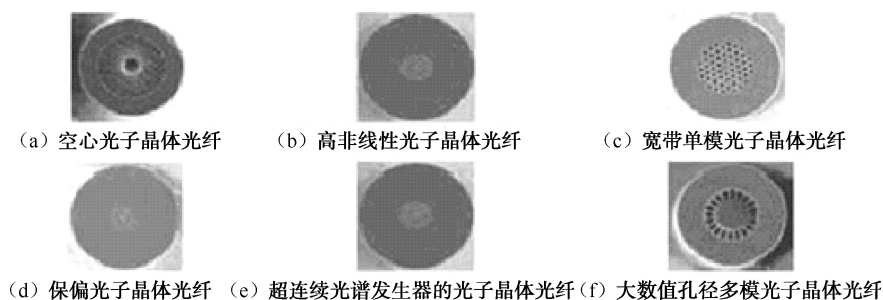


图 2-26 各种类型的光子晶体光纤

- 无截止单模；
- 有不同的色度色散；
- 有极好的非线性效应；
- 有优良的双折射效应；
- 有较高的入射功率；
- 有可控制的非线性；
- 易于实现多芯传输等，从而提高了信道通信的容量，解决了单芯难以胜任的复杂通信网络、矢量弯曲传感、光纤耦合等问题。

(2) 光子晶体光纤激光器。由于 PCF 有传统光纤无法获得的光特性，它不仅赋予了 PCFL 大功率输出等许多优点，也对光集成有着重要意义。目前，PCFL 已成为热门技术，在结构设计、工艺制作、提高功率和性能方面已取得重大进展，它不但发展迅速，且有发展潜力，将对光学、光电信息科学等领域产生重大影响。目前，已研制出下列几种 PCFL。

- 掺 Yb 的双包层 PCFL，它有获得 kW 级的输出潜力。
- 侧面泵浦的双包层 PCFL，它为改进大功率 PCFL 铺平了道路。
- 高偏振的 PCFL，可获得好于 200:1 的偏振比（最大传输与最小传输之比）。
- 大数值孔径 PCFL，它具有高达 0.9 数值孔径（NA）的 PCF，可根据需要拉伸为任意薄厚的薄壁。
- 聚合物 PCFL，它不需要反射镜，在 632 nm 波长的最大脉冲能量为 16 μ J，其峰值功率为 2 kW。
- 全光纤 PCF 喇曼激光器，它通过采用更小的芯径和选择掺 Ge 的 PCF，可将增益提高到 40 W/km 以上的理论值。由于理论上 PCFRL 的喇曼增益系数几乎为最佳化传统 FRL 的 7 倍，因此 PCFRL 将在许多应用中代替传统的激光器。

欲了解 PCFL 详情，可参阅本书参考文献[1, 2]。

2.4.5 激光器在安防中的应用

一般，由于激光是一种特殊的相干光源，且具有方向性强、亮度高等独特优点，因而在国防和国民经济各领域用途很广，如激光武器、激光制导、激光测量、激光扫描传感等。显然，激光技术在安防中的应用也很广泛。这里，仅介绍激光在安防中的几个典型的应用。

1. 用作激光红外光源

由于激光红外光源的光束细而强,要照亮一定范围的场景,则需要通过扩束镜头扩束。这种光源应用的最大优势在于激光具有很高的发光效率、发光强度和方向性,其电光转换效率最高可达 80%,从而可大大降低能耗,增加照明距离,目前多用于 1 km 以上距离的监控场景的夜视照明。一般,半导体红外激光器采用金属封装和专用电源,并通过先进的半导体温控技术使得产品始终在设定的合理温度下工作,寿命能够较好地得到保证。

红外激光光源与配有长焦距镜头的摄像机组合,可以较好实现夜间远距离监控。特别适合国家边防、海防、森林防火、交通工程等大型项目。但由于工艺比较复杂、产量比较低,其价格比 LED 光源高;且激光灯功率过大对身体健康有一定的副作用,因而应用时需选择功率在安全值。

最后需要指出的是,红外光源的选择最重要的问题是成套性,即红外灯与摄像机、镜头、防护罩、供电电源等的成套性。在设计方案时,应对所有器材综合考虑,即把它作为一个红外低照度夜视监控系统工程来考虑设计。除配套性外,还要考虑到以下因素:选择红外灯时,在选择红外灯辐照距离时留有余地;使用红外灯应选用黑白摄像机或是日夜两用摄像机,且摄像机的照度要低(一般 $<0.02\text{ Lux}$),要有自动电子快门功能,AGC 自动增益控制功能;所选用的镜头最好是红外镜头,还要有自动光圈,以适应昼夜照度很大的变化。此外,在选择红外光源时,还要注意其发热与散热问题,要注意选择红外灯的供电与灯板分开的红外光源,并且还必须有光控开关,因为红外灯只有在夜间才需要打开。

2. 用作车流量监控及车轮廓描画

面对交通运输业带来的能耗、污染及拥堵问题,发展智能交通是解决思路之一。而在智能交通中能得到实际应用的,大部分是利用脉冲法激光测距。在脉冲飞行时间激光传感器工作时,先由激光二极管对准目标发射激光脉冲,打到目标对象反射后激光产生漫反射,部分反射光经光学系统汇聚后被雪崩光电二极管接收。鉴于光速是已知的,记录并处理从光脉冲发出到返回被接收所经历的时间,即可测定目标距离。

这里介绍的车流量监控、车型描画,以及下面介绍的激光测速仪、汽车防撞系统、车辆行人违法监测等,基本上都是利用激光测距技术在安防智能交通 ITS 中的应用。

用作车流量监控及车轮廓描画使用方式一般固定在高速或者重要路口的龙门架上,激光发

射和接收垂直地面向下,对准一条车道的中间位置。当有车辆通行时,激光测距仪能实时输出所测得的距离值的改变,进而描绘出所测车的轮廓。这种测量方式一般使用的激光束发散角度较小,测距范围一般小于 30 m 即可,且要求激光测距速率比较高,一般要求达到几千赫。这对于在重要路段监控可以达到很好的效果,能够区分各种车型,对车身扫描的采样率可以达到每厘米一个点,且对车流限高、限长等都能实时输出结果,如图 2-27 所示。

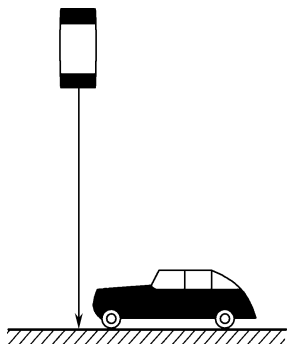


图 2-27 激光测距仪用于车流量监控及车轮廓描画示意图

在没有车辆到来时,激光测距仪测出的是一个距离常量,即激光测距仪到地面的距离。当有车辆从激光测距仪下面经过时,其距离值改变,当距离值再次回到常量就认

为有一辆车通过,根据这种方式可以对通过一些路段的车流量进行监控。现在常用的方法是对一段时间内的车流进行统计平均的方法,带有很大的估计成分,而视频统计的方法还有很多现实应用的困难,因此激光测距统计平均的方法为车流量统计提供了一种可行的方案。

3. 用作车辆行人违法监测

由于激光测距仪的光束不是实质性的障碍,在利用激光测距仪对路面进行监控时,并不会阻碍交通的正常运行,因此,在一些禁停或者禁止行人车辆通行的路段,可用红外激光束平行路面以一定高度进行固定发射或者以一定角度进行扫描。当遇到有车辆违法停车、闯红灯或者行人违法跨越护栏等,就会使激光测距距离值改变,从而可以进行报警或者警示。这种应用光束不必要太宽,但一般要求测距距离比较长,以确保一定路段长度的防护距离。这种方式构成的智能交通违法监控系统将在交通物联网中得到很大的应用。

当前,随着3G、4G、传感技术的发展进步,智能交通正伴随着物联网在向“新一代智能交通”发展,物联网作为一种融合短程无线通信技术、微电子、传感器、嵌入式系统的新技术,逐渐被用于新一代智能交通系统等需要数据采集与检测的相关领域,从而将给城市智能交通带来一次全新的升级。

4. 用作汽车防撞探测器

据报道,美国弗吉尼亚理工大学开发了一辆专门为盲人设计的汽车,其中,担负“眼睛”重任的是一个由激光传感器和数个摄像头组成的“驾驶柄”,“眼睛”通过激光传感器连接着不同的震动系统,起到了周围环境物体距离感知的作用,通过高速三维激光成像雷达系统,对汽车周围环境进行探测,利用获取的位置信息建立三维点云模型,为汽车路径规划,自主导航等提供重要的视觉基础。

一般,大多数现有汽车碰撞预防系统使用光束以不接触方式用于识别汽车前面或后面的目标与汽车之间的距离。当汽车的间距小于预定安全距离时,这样的汽车防撞系统能对汽车进行紧急刹车,或者对司机发出报警,或者综合目标汽车速度、车距、汽车制动距离、响应时间等对汽车行驶进行及时判断和响应,以便防止行车事故。

5. 用作激光测速仪

随着信息社会的发展和改革开放的不断深入,人民生活水平不断提高,汽车的普及率也越来越高,交通事故也时有发生,因而交通管理迫切需要对运行汽车进行检测,尤其是能对汽车车速有一个有效检测手段。检测汽车车速,比较常用的是微波雷达测速,其检测范围大,但其检测速度的准确值较差,因而最好采用汽车激光测速系统。

激光测速仪是采用激光测距的原理,对被测物体进行两次有特定时间间隔的激光测距,取得在此时间间隔内被测物体的距离变化,从而得到该被测物体的移动速度。

激光测速仪分为固定式和移动式两种。

(1) 固定式激光测速仪。它一般固定在路边或龙门架上,以一个比较小的角度迎向来车,一般通过车牌反射进行测量,其测量精度比较高,可以达到 ± 1 km/h,测速范围可以达到250 km/h,测距范围在此应用中不用太长,一般80~100 m即可。

(2) 移动式激光测速仪。它对操作要求比较高,一般光束发散角度要大于3 mrad,鉴于激光测速的原理,激光光束必须要瞄准垂直与激光光束的平面反射点,又由于车辆处于移动状态,



车体平面不大，且测速需要一定时间，只能作为临时测速取证应用。

由于激光测速仪光束发散角度较小，便于测速取证，不像雷达多普勒测速仪，在多车道测量时不能确知超速的具体车辆，且由于激光测速仪发射的是近红外的光波，不能被雷达探测器、电子狗等探测，且不易受市区雷达杂波干扰。激光测距仪用于智能交通测速，如图 2-28 所示。

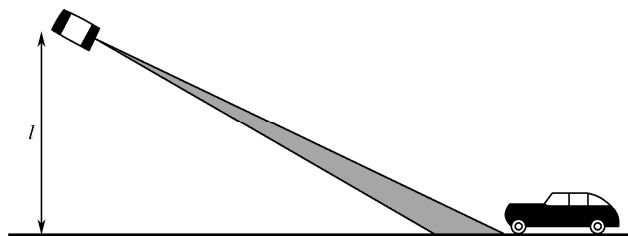


图 2-28 激光测距仪用于智能交通测速示意图

这种激光测速具有以下几个特点。

- 由于激光光束强、方向性好，其测速距离相对于微波雷达测速的有效距离远，可测 1 km 以外；
- 测速精度高，误差小于 1 km/h；
- 激光光束必须要瞄准垂直于激光光束的平面反射点，由于被测车辆距离远而处于移动状态，是非合作目标而不容易瞄准，目前美国激光技术公司已生产出带连续自动测速功能的激光测速仪，专门用于解决这一问题；
- 鉴于激光测速原理，激光测速仪不可能在运动中使用，只能在静止状态下应用，所以一般交警都把仪器放在巡逻车上，停车静止时使用；
- 激光测速仪的取证能力远远大于雷达测速仪，因而受到全世界广泛的认可和推广；
- 目前大部分国家采用的激光测速仪使用的是一类安全激光，对人眼睛安全，如选用波长为 905 nm 和 1 540 nm 的测距测速仪，即为安全的激光测距测速仪。

本书参考文献[6]的 9.3 节将专门介绍汽车激光测速系统的具体设计。

6. 用脉冲激光雷达监测识别环境安全

脉冲激光雷达实际上就是一个激光识别和测距仪器，简称 LIDAR，其智能探测与识别环境污染的工作原理，主要是它的光源是一个波长可调的激光器，在不同的波长下，通过接收从大气中返回的反射波的分析，能够测量大气污染浓度。它借助于污染物浓度测量的距离分辨图像，可以测到 10 亿分之一的污染浓度。总之，它可以测量遥远现场的自然状况（主要是大气和水体），也可用于大气污染的检测和测绘环境污染的纵向分布图。这种仪器也用于许多科学测量中，如南极臭氧、温度的纵向分布，海平面的浮游生物和叶绿体的分布等的测量。

脉冲激光雷达系统由脉冲激光发射系统、脉冲激光接收系统、控制与分析识别输出系统三部分组成，如图 2-29 所示。

脉冲激光雷达的光源具有高峰值功率，通常采用调 Q 激光器，它可以选择波长，使其与大气中某些待测成分的吸收峰一致。人们感兴趣的波长范围是从近紫外（300 nm）到远红外（10 μm），它与微波雷达仪测量用的 mm 和 cm 波不同。实际上，在光波长范围内有许多有用的谱线，几乎可用于大气中发现的所有气体种类，如二氧化氮、二氧化碳、水蒸气、臭氧和二氧化硫之类的气体、碳氢化合物、燃气、氟氯酸（CFC）等。

图中, VT_1 、 VT_2 、 R_{L1} 、 R_{P1} 、 R_1 、 K 、 VD_6 构成光控开关, 白天光敏电阻 R_{L1} 在光照下处于低阻态, VT_1 饱和导通、 VT_2 截止, 继电器 K 不通电, 常开触点 J 处于断开状态, 报警电路不工作; 夜晚, R_{L1} 变为高阻态、 VT_1 截止, VT_2 饱和导通, K 得电使 J 吸合, 电路为整机供电, 红色发光二极管 LED 亮, 稳压 6 V 经 VD_7 、 VD_8 、 VD_9 降压后为后续电路供电。激光棒 JB_1 、 R_{L2} 、 R_{P2} 、 R_3 、 R_4 组成一路激光发射与接收网络。报警器在守候状态时, 激光棒发出红色激光, 照射到光敏电阻 R_{L2} 上, R_{L2} 呈低阻态, VT_3 基极电位很低, 为晶闸管 VS 提供触发电流, VS 导通, IC_2 得电工作, 喇叭发出警报声。本报警器可同时设置多达 10 路激光发射与接收网络, 电路结构完全相同, C_3 为抗干扰电容。AN 为复位开关。当电网停电或歹徒切断电源时, 电池立即向整机供电, 保证了报警装置的可靠性。

② 元器件的具体选择与安装调试。图中, IC_1 选稳压集成电路 7806, 使用时需加铝质散热片。 IC_2 为 KD-9561 四声片, 本电路第二选声端 SEL2 (消防车警报声)。激光源选用电压为 4.5 V 、功率 $<5\text{ mW}$ 的红色激光棒 VT_1 、 VT_2 、 VT_3 等选用 9013, 要求 $\beta \geq 100$; 所有的光敏电阻都选用密封形的, 暗阻越大、亮阻越小越好, 型号不限。电阻均选用 $(1/8)\text{ W}$ 碳膜电阻。 T 为次级电压 9 V 的电源变压器, 功率要在 8 W 以上, 要尽量选用空载电流小、长时间空载电不发热的优质变压器。 K 为 6 V 微型电磁电器, 如 4099 型, 本电路使用其常开触点。扬声器为 $8\ \Omega$ 、 0.2 W 。 E 为 6 节 1 号串联电池。

R_{L1} 安装在能感受外界光线强度且夜晚灯光照不到的地方, 改变 R_{P1} 的阻值可以调整光控开关的灵敏度, 可根据实际情况设定。 R_{L2} 等接收激光的光敏电阻放在长 5 m 、内径 1 cm 的套筒内 (内壁涂黑), 以防止外界杂散光线干扰。在晚上光控开关使主机加电后, 激光照射到 R_{L2} 上, 调整 R_{P2} 使 VT_2 能可靠截止, VS 不导通; 当用手遮住激光后, VT_2 应可靠导通, 触发 VS 导通, 报警器发声 (当安装多组激光发射与接收网络时, 应分别加电调试)。 VS 一经触发, 即锁定在报警状态, 可按 AN 复位。

为增加防盗器的可靠性, 可按图 2-31 组成多道光路, 形成难以逾越的光幕。对于过道、走廊防盗, 可以多面反光镜安置在墙壁上, 这样激光经多次反射后被接收, 可减少元器件使用量, 节约成本 (反光镜不可设置过多, 因反光镜对光线有吸收作用), 如图 2-32 所示。

对于面积不大的场地, 可按照图 2-33 安装反光镜。但使用时应注意如下几点。

- 本报警器在雨、雪、雾灯天气情况下不适合使用;
- 空气中有灰尘、烟气的时候, 红色激光柱光路明显减弱, 容易被歹徒躲避穿越;
- 光敏电阻引线应尽量安装在隐蔽位置, 以免被歹徒短路, 导致报警器失灵;
- 应定期擦拭激光棒镜头、反光镜、光敏电阻上的灰尘。

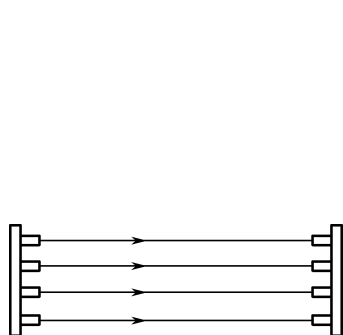


图 2-31 组成多道光路

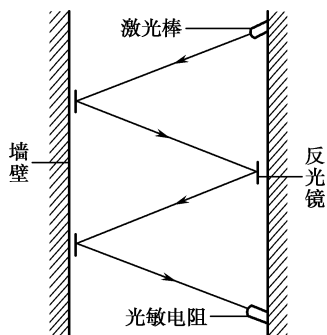


图 2-32 墙壁多面反光镜的安置

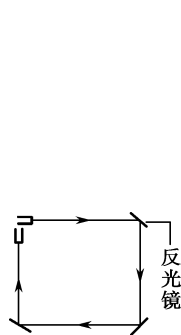


图 2-33 场地反光镜的安置

(2) 大范围激光防盗报警器。由于激光电筒发出的激光束方向性好、射程远,有效射程超过千米。利用这一特点,可以广泛应用于住宅小区、货场、鱼塘、果园等露天场所的大面积的区域性警戒防护,有效范围可达 $100\,000\text{ m}^2$, 有很强的实用性。

① 大范围激光防盗报警器电路及工作原理,如图 2-34 所示。

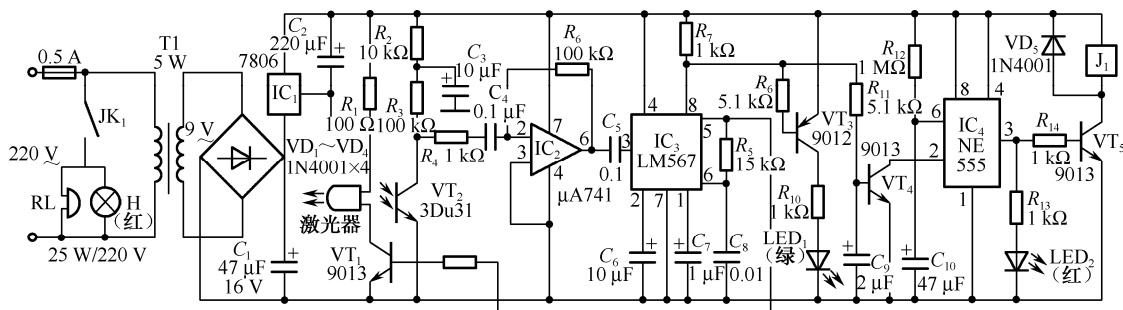


图 2-34 大范围激光防盗报警器电路及工作原理

图中,电路的核心是 IC_3 (LM567) 及其外围阻容元件构成的锁相环电路。当其输入端 3 脚输入的信号与本身振荡信号的相位(频率)相一致时,其逻辑输出端 8 脚输出保持为低电平;当输入端输入的信号与其振荡信号相位不同时,其 8 脚输出为高电平。电路中采用了免调整的同频工作方式,利用锁相环电路本身的振荡信号(锁相环电路的工作频率由外围的 R_8 、 C_8 的参数来决定)同时作为激光器的调制信号,使收发电路工作于同一振荡频率上,工作方式更加简便可靠。

当电路工作时,锁相环电路 IC_3 的 5 脚输出的振荡信号,经 R_5 输送到 VT_1 放大后,推动激光器发出载有调制信号激光束。激光束在传播途径中经多次反射后,照射到接收部分的光电管 VT_2 上并转变为交变电信号,该信号经 R_4 、 C_4 耦合到运放 IC_2 的 2 脚上,通过 IC_2 放大后输送到锁相环电路 IC_3 的 3 脚。由于此信号的相位与锁相环电路的振荡信号完全一致,故经内部比较鉴别后,逻辑输出端 8 脚输出低电平, VT_4 截止, VT_3 导通,绿色发光管 LED_1 点亮;而当有人侵入警戒区域时,激光器发射的激光束被遮挡,传输路径被中断,光电管 VT_2 瞬间内不能接收到信号,此时锁相环电路的输入端没有信号输入,逻辑输出端 8 脚跃变为高电平, VT_3 截止, VT_4 导通, IC_4 的 2、6 脚变为低电平,由 IC_4 等构成的单稳态延时电路翻转,其 3 脚输出高电平,红色发光管 LED_2 点亮;同时, VT_5 导通,继电器 J_1 吸合,从而接通告警电路——电铃 R_L 及红色灯泡 H 发出声光报警信号,报警时间的长短由单稳态电路的暂态时间来决定,按图中所注参数计算,大约为 50 s。

② 元器件的具体选择与安装调试。电路中, R_L 为 220 V 交流电铃; H 为 220 V 红色灯泡,可以多盏并接; J_1 选用工作电压为 6 V 的继电器,触点电流大于 2 A 即可;其他元器件多为常用元器件,按标注参数选择即可。

为确保电路工作可靠,最好加接直流稳压电源,以防止市电出现问题时报警电路失灵。

(3) 安装与调整。矩形警戒区的激光束路径如图 2-35 所示。三面平面镜在水平方向上均与激光束成 45° ,对于不规则的警戒区域,可以通过增加平面镜的数量来实现全

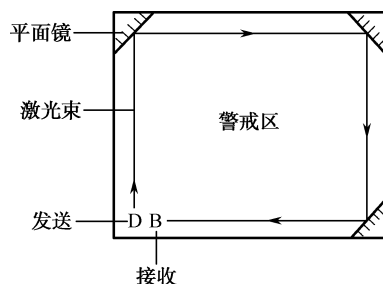


图 2-35 矩形警戒区的激光束路径



方位的警戒。在调整平面镜的过程中,应防止激光束对眼睛的伤害。虽然激光电筒发出的激光束功率只有几毫瓦,但其强度却超过阳光的 1 000 倍,容易对人的视网膜造成伤害。

8. 利用激光进行火灾探测

目前,利用激光进行火灾探测的方法很多,这里就不具体论述。实用的有下列四种。

(1) 激光散射型感烟探测系统,它可有效地克服现有火灾烟雾探测器的不足,在烟雾微粒识别、灵敏度、准确性和环境适应等方面均取得新的进展。

(2) 采用量子级联激光器的气体检测装置可以实现火灾的早期报警,以及微量有毒有害气体泄漏的快速、准确探测。

(3) 基于近红外可调谐半导体激光吸收光谱的火灾气体检测系统,可利用波长调制光谱和调制频率多路技术实现了 CO 和 CO₂ 的同时检测。

(4) 激光图像感烟技术,可实现大空间火灾探测技术从现行的点式强度型向图像模式识别型的技术跨越等。

9. 激光显示系统

众所周知,监控场景的显示器是安防视频监控系统重要的终端设备,但实际上其核心主要是光电信息技术中的电光转换器件,即以发光器件为核心组成的,其详情将在后面光电信息显示技术中论述,这里仅简介激光器作为显示器的一种应用。

传统的背投影显示方案主要是以光源、色轮、图像引擎芯片、光路、投影的合色、投影物镜和屏幕的过程组成的。如采用激光作为投影光源,可充分发挥激光光源分色分时特性,采用光谱合成以及分时工作的模式,直接应用于照明光学图像芯片,抛弃过去在光机中一定使用到的 UV、红外、偏振镜、复眼透镜这样的一些光学器件,可大幅简化投影机光路结构。

激光显示系统主要由三基色激光光源、光学引擎和屏幕三部分组成。光学引擎则主要由红、绿、蓝三色光阀、合束 X 棱镜、投影镜头和驱动光阀组成,光阀驱动使光阀上分别生成红、绿、蓝三色对应的小画面,然后分别引入三色激光照明投影到屏幕上,即产生全色显示图像。

因此,激光显示技术是以高饱和度的红、绿、蓝(RGB)三基色激光作为光源的显示技术。其充分利用激光波长可选择性和高光谱亮度的特点,使显示图像具有更大的色域表现空间,色域覆盖率可达 90%,可实现 2 倍于传统光源的色彩再现能力,色彩饱和度为传统显示的 100 倍以上。最大限度地能展现人眼可以识别的色彩,真实地再现客观世界丰富、艳丽的色彩,提供更具震撼的表现力。

此外,在裸眼与真 3D 立体显示技术中,均要用到红、绿、蓝(RGB)三基色激光作为光源的显示。例如,用激光投影的全像投影式(Holographic),它利用红、绿、蓝 3 色激光光源各自经过调变器产生相位型光栅,激光在经过全像片合并之后,以垂直扫描镜及多面镜进行垂直及水平的扫描,使立体影像呈现出来;又如体积式(Volumetric),它是由 TI 公司所开发的激光 3D 投影技术,以激光光照射在一个高速旋转盘上的散射现象,于一个玻璃密闭空间内显示立体物件的每一个点,从而组成立体影像;再如全息三维显示等,都需要利用激光的特性。

光辐射信息探测器件及其 在安防中的应用

3.1 光辐射信息探测器件概述

光辐射信息探测器件是光辐射信息的接收器，它是利用物质的光电与热电效应把光辐射信号转换成电信号的器件。这种对应转换的电信号，经放大与模/数转换等，就可供后续的计算机处理。因此，光辐射信息探测器件的性能，对光电系统与安防监控系统的性能影响很大，如缩小系统的体积、减轻系统的重量、增大系统的作用距离等。它在军事上、空间技术、公共安全和其他的科学技术以及工农业等生产上，都得到了广泛的应用。显然，光辐射信息探测器件对光电信息系统与安防监控系统都是必不可少而且非常重要的。

3.1.1 光辐射信息探测器件的类型和特点

根据光辐射信息探测器件对辐射作用方式的不同（或说工作机理的不同），一般可分为光电探测器件（或光敏器件）和热电探测器件（或热敏器件）两大类。

1. 光电探测器件

（1）光电探测器件的类型。

- 光电发射型探测器件，如光电管和光电倍增管；
- 光电导型探测器件，如光敏电阻；
- 光伏型探测器件，如光电池与光电二/三极管等。

（2）光电探测器件的特点。

- 响应波长有选择性，因这些器件都存在某一截止波长 λ_0 ，超过此波长，器件无响应；
- 响应速度快，一般为纳秒到几百微秒；
- 峰值灵敏度高，其比探测率 $D^*=10^{10}\sim 10^{16} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ ，即探测率已达到背景限；
- 长波段探测需低温制冷。



2. 热电探测器件

(1) 热电探测器件的类型。

- 热电偶和热电堆;
- 热敏电阻;
- 热释电探测器等。

(2) 热电探测器件的特点。

- 响应波长无选择性, 即它对从可见光到远红外的各种波长的辐射同样敏感;
- 响应慢, 即吸收辐射产生信号需要的时间长, 一般在几毫秒以上;
- 灵敏度低, 其探测率只有背景限的 1/10, 理想的 D^* 接近 $1.81 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$;
- 无须制冷, 可在室温下工作。

3.1.2 光辐射信息探测器件的基本特性参数

各种光辐射信息探测器件, 由于它们的工作原理及结构各不相同, 因此需用多个参数来说明其特性。本节将讨论这些器件共有的常用参数, 以便于后面具体介绍器件。

1. 有关响应方面的特性参数

(1) 响应度 (或称为灵敏度)。响应度 (或称灵敏度) 是光辐射信息探测器件最重要的参数, 它是其输出信号与输入辐射功率之间关系的度量。描述的是光辐射信息探测器件的光-电转换效能。定义为光辐射信息探测器件输出电压 U_o 或输出电流 I_o 与入射光功率 P_i (或通量 Φ) 之比。即

$$S_v = \frac{U_o}{P_i}; \quad S_i = \frac{I_o}{P_i} \quad (3-1)$$

式中, S_v 和 S_i 分别称为电压响应度 (或灵敏度) 和电流响应度 (或灵敏度)。由于光辐射信息探测器件的响应度 (或灵敏度) 随入射光的波长而变化, 因此又有光谱响应度和积分响应度。

(2) 光谱响应度。光谱响应度 (或灵敏度) $S(\lambda)$ 是光辐射信息探测器件的输出电压或输出电流与入射到检测器件上的单色辐通量 (或光通量) 之比。即

$$S(\lambda) = \frac{U_o}{\Phi(\lambda)} (\text{V/W}); \quad S(\lambda) = \frac{I_o}{\Phi(\lambda)} (\text{A/W}) \quad (3-2)$$

式中, $S(\lambda)$ 为光谱响应度, $\Phi(\lambda)$ 为入射的单色辐通量或光通量。如果 $\Phi(\lambda)$ 为光通量, 则 $S(\lambda)$ 的单位为 V/lm 或 A/lm 。

光谱响应度表述入射的单色通量或光通量所产生的探测器的输出电压 (或电流) 其值越大, 则意味着探测器越灵敏, 因而响应度也称为灵敏度。

(3) 积分响应度。积分响应度表示探测器对连续辐射通量的反应程度, 对包含有各种波长的辐射光源, 总光通量为

$$\Phi = \int_0^\infty \Phi_\lambda d\lambda \quad (3-3)$$

光电探测器输出的电流或电压与入射总光通量之比称为积分响应度。由于光辐射信息探测器件输出的光电流是由不同的波长的光辐射引起的, 所以输出光电流应为

$$I_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_0} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_0} S_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda \quad (3-4)$$

由式(3-3)和式(3-4)可得积分响应度为

$$S = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_0} S_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda} d\lambda} \quad (3-5)$$

式中, λ_0 、 λ_1 分别为光辐射信息探测器的长波限和短波限。由于采用不同的辐射源, 甚至具有不同色温的同一辐射源, 所发生的光谱通量分布也不相同, 因此提供数据时, 应指明采用的辐射源及其色温。

(4) 响应时间。响应时间是描述光辐射信息探测器对入射辐射响应快慢的一个参数, 即当入射辐射到光辐射信息探测器后, 或入射辐射遮断后, 光辐射信息探测器的输出上升到稳定值, 或下降到照射前的值所需时间称为响应时间。为衡量响应时间的长短, 常用时间常数 τ 的大小来表示。当用一个辐射脉冲照射光电探测器, 如果这个脉冲的上升和下降时间很短, 如方波, 则光辐射信息探测器的输出由于器件的惰性而有延迟, 把从 10% 上升到 90% 峰值处所需的时间称为探测器的上升时间 t_r , 而把从 90% 下降到 10% 处所需的时间称为下降时间 t_f 。如图 3-1 所示。

(5) 频率响应。由于光辐射信息探测器信号的产生和消失存在着一个滞后过程, 所以入射光辐射的频率对光辐射信息探测器的响应将会有较大的影响。光辐射信息探测器的响应随入射辐射的调制频率而变化的特性称为频率响应, 利用时间常数可得到光辐射信息探测器响应度与入射调制频率的关系, 其表达式为

$$S(f) = \frac{S_0}{[1 + (2\pi f \tau)^2]^{1/2}} \quad (3-6)$$

式中, $S(f)$ 为频率 f 时的响应度; S_0 为频率是零时的响应度; τ 为时间常数 (等于 RC)。

当 $\frac{S(f)}{S_0} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ 时, 可得到放大器的上限截止频率, 如图 3-2 所示。

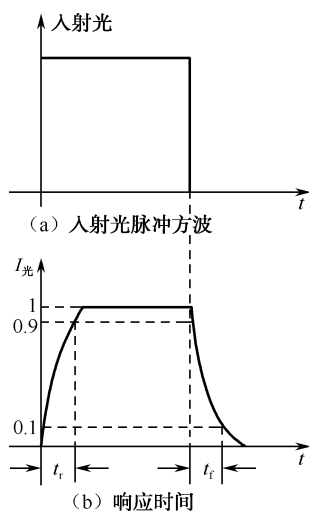


图 3-1 上升时间和下降时间

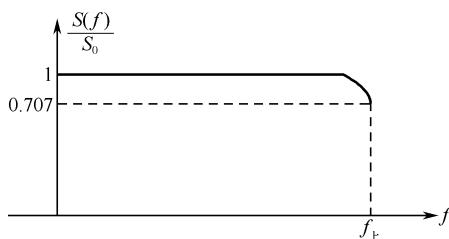


图 3-2 光电探测器的频率响应曲线

$$f_{\pm} = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi RC}$$

显然, 时间常数 RC 决定了光辐射信息探测器件频率响应的带宽。

2. 有关噪声方面的参数

从响应度的定义来看, 好像只要有光辐射存在, 不管它的功率如何小, 都可探测出来。但事实并非如此。当入射辐射功率很低时, 输出只是些杂乱无章的变化信号, 而无法肯定是否有辐射入射在探测器上。这并不是因探测器不好引起的, 而是它所固有的“噪声”引起的。如果对这些随时间而起伏的电压(流)按时间取平均值, 则平均值等于零。但这些值的均方根值不等于零, 这个均方根电压(流)称为探测器的噪声电压(流)。

(1) 光辐射信息探测器件的噪声。下面主要介绍器件的内部噪声, 即基本物理过程所决定的噪声, 它们主要有以下几种。

① 热噪声。也称为约翰逊噪声, 即载流子无规则的热运动造成的噪声。当温度高于绝对零度时, 导体或半导体中每一电子都携带着 $1.59 \times 10^{-19} \text{C}$ 的电量作随机运动(相当于微电脉冲), 尽管其平均值为零, 但瞬时电流扰动在导体两端会产生一个均方根电压, 称为热噪声电压, 其均方值为

$$\overline{U}_{\text{NT}}^2 = 4kTR\Delta f \quad (3-8)$$

用噪声电流表示为

$$\overline{I}_{\text{NT}}^2 = 4kT\Delta f / R \quad (3-9)$$

式中, R 是导体阻抗的实部; k 是玻尔兹曼常数; T 是导体的绝对温度; Δf 是测量系统的噪声带宽。式(3-9)说明, 热噪声存在于任何电阻中; 热噪声与温度成正比; 热噪声与频率无关。说明噪声是各种频率分量组成, 就像白光是由各种波长的光组成一样, 所以热噪声可称为白噪声。

② 散粒噪声。也称为散弹噪声, 即穿越势垒的载流子的随机涨落(统计起伏)所造成的噪声。在每个时间间隔内, 穿过势垒区的载流子数或从阴极到阳极的电子数都围绕一平均值上下起伏。理论证明, 这种起伏引起的均方噪声电流为

$$\overline{I}_{\text{Nsh}}^2 = 2qI_{\text{DC}}\Delta f \quad (3-10)$$

式中, I_{DC} 是流过器件的电流直流分量(平均值); q 为电子电荷。散粒噪声也是白噪声。

③ 产生-复合噪声。载流子的产生率与复合率在某个时间间隔也会在平均值上下起伏, 这种起伏导致载流子浓度的起伏, 从而也产生均方噪声电流, 其表达式为

$$\overline{I}_{\text{Ngr}}^2 = \frac{4qI(\tau/t_{\text{漂}})\Delta f}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2} \quad (3-11)$$

式中, I 是流过器件的平均电流; τ 为载流子平均寿命; $t_{\text{漂}}$ 为载流子在器件两电极间的平均漂移时间; f 为频率。因此, 这种噪声不是白噪声。

但是, 如果频率很低, 且满足 $2\pi f\tau \ll 1$ 时, 此时 $\overline{I}_{\text{Ngr}}^2 = 4qI(\tau/t_{\text{漂}})\Delta f$, 这时的产生复合噪声, 即白噪声。

④ $1/f$ 噪声。也称闪烁噪声或低频噪声。它是由于光敏层的微粒不均匀或不必要的微量杂质的存在。当电流流过时, 在微粒间发生微火花放电而引起的微电爆脉冲。其经验式为

$$\overline{U}_{\text{Nf}}^2 = \frac{K_f I^\alpha R^\gamma \Delta f}{f^\beta} \quad \text{或} \quad \overline{I}_{\text{Nf}}^2 = \frac{K_f I^\alpha \Delta f}{f^\beta} \quad (3-12)$$

式中, K_f 为与元件制作工艺、材料尺寸、表面状态等有关的比例系数; α 为与流过元件的电流有关, 通常 $\alpha=2$; β 为与元件材料性质有关, 其值在 0.8~1.3 间, 大部分材料 $\beta=1$; γ 为与元件阻值有关, 一般在 1.4~1.7 之间。

当其他参数不变时, I_{Nf} 与 $1/f$ 成比例, 所以称为 $1/f$ 噪声。显然, 频率越低, 噪声越大, 故也称低频噪声。这种噪声不是白噪声, 而属于“红”噪声, 相当于白光的红色部分。

(2) 衡量噪声的参数。

① 信噪比 (S/N)。信噪比是判定噪声大小通常使用的参数, 它是在负载电阻 R_L 上产生的信号功率与噪声功率之比, 即

$$\frac{S}{N} = \frac{P_S}{P_N} = \frac{I_S^2 R_L}{I_N^2 R_L} = \frac{I_S^2}{I_N^2} \quad (3-13)$$

若用分贝 (即 dB) 表示, 则为

$$\left(\frac{S}{N} \right)_{\text{dB}} = 10 \lg \frac{I_S^2}{I_N^2} = 20 \lg \frac{I_S}{I_N} \quad (3-14)$$

利用 S/N 评价两种光电器件性能时, 必须在信号辐射功率相同的情况下才能比较。但对单个光电器件, 其 S/N 的大小与入射信号辐射功率及接收面积有关。如果入射辐射强, 接收面积大, S/N 就大, 但性能不一定就好。因此, 用 S/N 评价器件有一定的局限性。

② 等效噪声输入 (ENI)。即器件在特定带宽内 (1 Hz) 产生的均方根信号电流恰好等于均方根噪声电流值时的输入通量, 此时, 其他参数, 如频率、温度等都应加以规定。这个参数是在确定光辐射信息探测器件的探测极限 (以输入通量为瓦或流明表示) 时使用。

③ 噪声等效功率 (NEP)。实际上就是最小可探测功率 P_{min} 。它定义为信号功率与噪声功率之比为 1 (即 $S/N=1$) 时, 入射到探测器件上的辐射通量 (单位为瓦)。即

$$\text{NEP} = \frac{\Phi_e}{S/N} \quad (3-15)$$

值得指出的是, NEP 只有在 ENI 的单位为瓦时, 才与之等效。一般, 一个好的探测器件的 NEP 约为 10^{-11} W。显然, NEP 越小, 噪声越小, 器件的性能越好。

④ 探测率 D 与归一化探测率 D^* 。探测率 D 定义为噪声等效功率的倒数, 即

$$D = \frac{1}{\text{NEP}} \quad (3-16)$$

显然, D 越高, 器件性能越好。为了在不同带宽内, 对测得的光敏面积的探测器件进行比较, 使用了归一化探测率 (也称为比探测率) D^* 这一参数。其表达式为

$$D^* = \frac{\sqrt{A \Delta f}}{\text{NEP}} = D \sqrt{A \Delta f} \quad (3-17)$$

式中, A 为光敏面积; Δf 为测量带宽。

⑤ 暗电流 I_d 。即光辐射信息探测器件仅在加有电源时, 而没有输入信号和背景辐射时所流过的电流。一般, 测量其直流值或平均值。显然, 不加电源的光辐射信息探测器件, 在没有输入信号和背景辐射时, 其暗电流为零。



3. 其他参数

(1) 量子流速率 N 与量子效率 $\eta(\lambda)$ 。量子效率是评价光电器件性能的一个重要参数,它是在某一特定波长上每秒钟内产生的光电子数与入射光量子数之比。因此,为了求出量子效率,必须先求出每秒入射的光量子数,以及每秒内产生的光电子数。

由第1章知,单位波长的辐射通量为 $\Phi_{e\lambda}$, 波长增量 $d\lambda$ 内的辐射通量为 $\Phi_{e\lambda}d\lambda$, 而单个光量子的能量为 $h\nu = hc/\lambda$, 所以在此窄带内的辐射通量,除以单个光量子的能量 $h\nu$, 即为每秒入射的光量子数。这个每秒入射的光量子数,也就是量子流速率 N , 即

$$N = \frac{\Phi_{e\lambda} d\lambda}{h\nu} = \frac{\lambda \Phi_{e\lambda} d\lambda}{hc} \quad (3-18)$$

显然,每秒产生的光电子数,也就是产生的信号电荷 I_s 除以电子电荷 q , 即

$$\frac{I_s}{q} = \frac{S(\lambda) \Phi_{e\lambda} d\lambda}{q} \quad (3-19)$$

式中, I_s 为信号电流; q 为电子电荷。由此,在某一特定波长上每秒内产生的光电子数与入射光量子数之比,即为量子效率 $\eta(\lambda)$, 其表达式为

$$\eta(\lambda) = \frac{I_s / q}{N} = \frac{S(\lambda)hc}{q\lambda} \quad (3-20)$$

在理论上,若 $\eta(\lambda)=1$, 则表明入射一个光量子就能发射一个电子或产生一对电子空穴对;但实际上, $\eta(\lambda)<1$ 。一般, $\eta(\lambda)$ 反映的是入射辐射与最初的光敏元的相互作用。对于有增益的光电器件(如光电倍增管等), $\eta(\lambda)$ 会远大于 1, 此时我们一般会使用增益或放大倍数这个参数。

(2) 线性度。线性度用于描述探测器件的光电特性或光照特性曲线输出信号与输入信号保持线性关系的程度,即在规定的范围内,探测器件的输出电量精确地正比于输入光量的性能。在这规定的范围内,探测器件的响应度是常数,这一规定的范围就称为线性区。

光辐射信息探测器件线性区的大小,与探测器后的电子线路有很大关系。因此,要获得所要的线性区,必须设计有相应的电子线路。线性区的下限一般由器件的暗电流和噪声因素决定,上限由饱和效应或过载决定。光电探测器件的线性区还随偏置、辐射调制及调制频率等条件的变化而变化。

线性度是辐射功率的复杂函数,它是指器件中的实际响应曲线接近拟合直线的程度,通常用非线性误差 δ 来度量。

$$\delta = \frac{\Delta_{\max}}{I_2 - I_1} \quad (3-21)$$

式中, Δ_{\max} 为实际响应曲线与拟合直线之间的最大偏差; I_1 、 I_2 分别为线性区中的最小和最大响应值。

显然,在光电检测技术中,线性是应认真考虑的问题之一,尤其在光度和辐射度等测量中十分重要,一般应结合具体情况进行选择和控制在。

(3) 工作温度。通常,当光辐射信息探测器件工作温度不同时,其性能会有变化。例如,像 HgCdTe 探测器一类的器件在低温(77 K)工作时,有较高的信噪比,而锗掺铜光电导器件在 4 K 左右时,能有较高的信噪比,但如果工作温度升高,它们的性能逐渐变差,以致无法使用;又例如,InSb 器件,工作温度在 300 K 时,长波限为 7.5 μm , 峰值波长为 6 μm , D_{λ}^* 为 $1.9 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$; 而工作温度变化 77 K 时,长波限为 5.5 μm , 峰值波长为 5 μm , D_{λ}^* 为

$4.3 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 其变化非常明显。对于热探测器件, 由于环境测试变化会使响应度、 D^* , 以及噪声发生变化, 所以工作温度就是指光辐射信息探测器件最佳工作状态时的温度, 它也是光辐射信息探测器件的重要性能参数之一。

由于光电发射型探测器件在安防系统设备中基本未采用, 因而这里不做介绍。以下主要讨论半导体光电导型与光伏型的探测器件及其在安防中的应用。

3.2 半导体光电导型探测器件及其在安防中的应用

半导体光电导型探测器件, 即光电导效应的器件 (PC 器件), 它利用硅、锗等本征半导体与杂质半导体, 可制成电导率随入射光变化的器件, 称为光电导效应器件或光敏电阻。

3.2.1 光电导型探测器件的结构及原理

1. 光敏电阻基本结构

光敏电阻是在绝缘材料上装梳状等光电导体封闭在金属或塑料外壳内, 再在两端连上欧姆接触的电极而成的。为避免外部干扰, 入射窗口装有透明保护窗, 使起特殊滤光作用 (对所需光谱透明)。目前光敏电阻, 一般采用 E_g 较大的材料, 如金属的硫化物和硒化物等, 使得在室温下能获得较大的暗电阻 (无光照时的电阻); 采用 N 型材料, 因 $\mu_n > \mu_p$, 这样增益也就大些。

由光电导效应可知, 光敏电阻的光电导灵敏度与光敏电阻两极间距离 l 的平方成反比, 为了提高光敏电阻的光电导灵敏度, 就要尽可能缩短光敏电阻两极间的距离 l 。根据光敏电阻这一设计原则, 可以设计出如图 3-3 所示的三种光敏电阻基本结构。图 3-3 (a) 所示的光敏面为梳形结构, 两个梳形电极之间为光敏电阻材料。由于两个梳形电极靠得很近, 电极间距很小, 因而光敏电阻的灵敏度很高; 图 3-3 (b) 所示的光敏面为蛇形结构, 其电极间距 (为蛇形光电材料的宽度) 也很小, 从而也提高了灵敏度; 图 3-3 (c) 所示为刻线式结构的光敏电阻侧视图, 它在制备好的光敏电阻衬基上刻出狭窄的光敏材料条, 然后蒸涂金属电极, 从而构成刻线式结构的光敏电阻。因此, 在均匀的具有光导效应的半导体材料两端加上电极, 便构成光敏电阻。

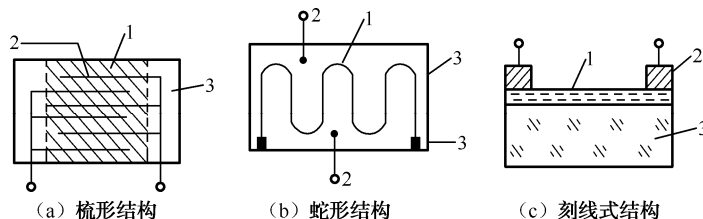


图 3-3 光敏电阻结构示意图

2. 光敏电阻的原理

光敏电阻的原理及电路的符号如图 3-4 所示。当图中光敏电阻的两端加上适当的偏置电压 U_{bb} 后, 便有电流 I_p 流过。改变照射到光敏电阻上的光照度, 流过光敏电阻的电流 I_p 将发生变化, 说明光敏电阻的阻值随照度变化。一般有光照时的光敏电阻的阻值称为亮电阻。此时可得

出光电导 g 与光电流 I_p 的表达式为

$$g = g_L - g_d; \quad I_p = I_L - I_d \quad (3-22)$$

式中, g_L 为亮电导; g_d 为暗电导; I_L 为亮电流; I_d 为暗电流。

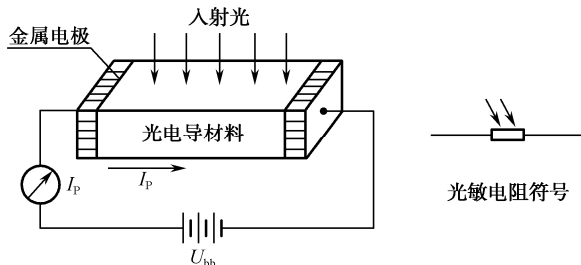


图 3-4 光敏电阻的原理与光敏电阻的符号

根据半导体材料的分类,光敏电阻有两大基本类型——本征型与杂质型。由于本征型半导体光敏电阻的长波限要短于杂质型的长波限,因此本征型半导体光敏电阻常用于可见光波段的探测;而杂质型半导体光敏电阻常用于红外波段甚至于远红外波段辐射的探测。

3. 光敏电阻的特点

- 灵敏度高;
- 工作电流大(达数毫安);
- 光谱响应范围宽;
- 非线性动态范围与所测光强范围宽;
- 无极性而使用方便;
- 响应时间长;
- 频率特性差;
- 强光线性差;
- 受温度影响大等。

4. 几种常用的光敏电阻

(1) CdS (Se) 光敏电阻。这一种光敏电阻是使用最广泛的,它们的光敏面为图 3-3 (b) 所示的蛇形光敏面结构。CdS 光敏电阻的光谱响应特性最接近人眼视见函数,线性度与温度特性较好,但响应速度慢,时间常数为 0.1 s,被广泛地应用于灯光的自动控制及照相机的自动测光等;CdSe 光敏电阻的响应与白炽灯或氙灯等光源的光输出有良好的匹配,其响应速度快,时间常数 0.01 s,但线性度与温度特性不太好,常作为光电开关使用。

CdS 光敏电阻的峰值响应波长为 $0.52 \mu\text{m}$, CdSe 光敏电阻为 $0.72 \mu\text{m}$,通过调整 S 和 Se 的比例,可使 Cd (S, Se) 光敏电阻的峰值响应波长控制在 $0.52 \sim 0.72 \mu\text{m}$ 。

(2) PbS 光敏电阻。即近红外波段最灵敏的光电导器件,其光电导的厚度为 μm 量级的多晶薄膜或单晶硅薄膜。由于 PbS 在 $2 \mu\text{m}$ 附近的红外辐射的探测灵敏度很高,因而常用于火灾等领域的探测。PbS 的光谱响应及探测率等特性与工作温度有关,随着温度的降低其峰值响应波长向长波长方向延伸,且比探测率增加。如室温下的 PbS 光敏电阻的光谱响应范围为 $1 \sim 3.5 \mu\text{m}$,峰值波长为 $2.4 \mu\text{m}$,峰值比探测率 D^* 高达 $1 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz} \cdot \text{W}^{-1}$ 。当温度降到 195K 时,

光谱响应范围为 $1\sim 4\ \mu\text{m}$ ，峰值响应波长移至 $2.8\ \mu\text{m}$ ，峰值比探测率 D^* 也增高到 $2\times 10^{11}\ \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。

(3) Insb 光敏电阻。它是 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 光谱范围内的主要探测器件之一。Insb 光敏电阻由单晶材料制备，制造工艺比较成熟，其光敏面的尺寸为 $0.5\ \text{mm}\times 0.5\ \text{mm}\sim 8\ \text{mm}\times 8\ \text{mm}$ 。大光敏面的器件由于不能做得很薄，其探测率较低。Insb 不仅适用于制造单元器件，也适宜制造阵列红外探测器件。

Insb 光敏电阻在室温下的长波长可达 $7.5\ \mu\text{m}$ ，峰值波长在 $6\ \mu\text{m}$ 附近，峰值比探测率 D^* 约为 $1\times 10^{11}\ \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。当温度降到 $77\ \text{K}$ （液氮）时，其长波限由 $7.5\ \mu\text{m}$ 缩短到 $5.5\ \mu\text{m}$ ，峰值波长也将移至 $5\ \mu\text{m}$ ，恰好为大气窗口的范围，其峰值比探测率 D^* 也升高到 $2\times 10^{11}\ \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。

(4) $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 系列光敏电阻。它是目前所有红外探测器件中性能最优良且最有前途的探测器件，尤其是对于 $4\sim 8\ \mu\text{m}$ 大气窗口波段辐射的探测更为重要。 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 系列光电导体是由 HgTe 和 CdTe 两种材料的晶体混合制造的，其中 x 表明 Cd 元素含量的组分。制造混合晶体选用不同 Cd 的组分 x ，可以得到不同的禁带宽度 E_g ，从而制造出不同波长响应范围的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 探测器件。一般组分 x 的变化范围为 $0.18\sim 0.4$ ，长波限的变化范围为 $1\sim 30\ \mu\text{m}$ 。

3.2.2 光敏电阻的特性参数

1. 灵敏度

除常用的电流灵敏度 S_I 与电压灵敏度 S_V 以外，还有下列几个灵敏度。

(1) 光电导灵敏度 S_g 。即光敏电阻的光电导 g 与输入光照度 E 之比，即

$$S_g = g/E = gA/\Phi \quad (3-23)$$

式中， A 为光敏面积； Φ 为入射的通量。由欧姆定律可知，电流 I 与电压 U 的关系为 $I=gU$ ，将式 (2-19) 中 $g=S_gE$ 代入可得到弱光照时的线性关系，即

$$I=S_gEU \quad (3-24)$$

(2) 电阻灵敏度 S_R 。暗电阻 R_d 与亮电阻 R_L 之比，称为电阻变化倍数，即 $K_R=R_d/R_L$ 。而电阻灵敏度为

$$S_R=(R_d-R_L)/R_d=\Delta R/R_d \quad (3-25)$$

式中， $\Delta R=R_d-R_L$ ，显然差别越大越好。

(3) 比灵敏度 S_B 。也称为积分比灵敏度，即

$$S_B=I_L/(\Phi U)=S_I/U \quad (3-26)$$

2. 光电特性

光电流 I_L 与输入辐射通量 Φ 的关系为

$$I_L=AU\Phi^\gamma \quad (3-27)$$

式中， A 为光敏材料决定的常数； U 为电源电压； γ 为照度指数，一般为 $0.5\sim 1$ 。弱光照时， $\gamma=1$ ，即线性光电导；强光照时， $\gamma=0.5$ ，即抛物线性光电导。

3. 伏安特性（输出特性）

如图 3-5 所示，光敏电阻是一个纯电阻，因此符合欧姆定律，故曲线为直线，具有与普通



电阻相似的伏安特性。图中虚线为允许功耗或额定功耗线。使用时,应不使光敏电阻的实际功耗超过额定值。在设计负载电阻时,应不使负载线与额定功耗线相交,使光敏电阻的工作电压、电流控制在额定功耗线之内。

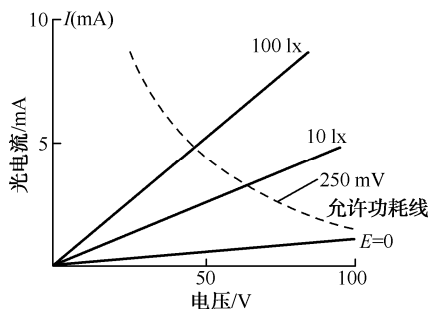


图 3-5 光敏电阻的伏安特性

4. 温度特性

光敏电阻的特性参数受温度影响较大,只要温度略有变化,其光谱响应率、峰值响应波长、长波限等参数都将发生变化,且没有规律。为了提高性能的稳定性、降低噪声、提高探测率,采用专门的冷却装置冷却灵敏面是十分必要的,因此,降低或控制光敏电阻工作温度是提高工作稳定性的有效办法,尤其对长波长红外辐射的检测更为重要。

5. 前历效应

它是指光敏电阻的时间特性与工作前历史有关的一种现象。前历效应有暗态前历与亮态前历之分。暗态前历效应是指光敏电阻在工作前处于暗态,当它突然受到光照时,表现为暗态前历越长,光电流上升越慢,一般,工作电压越低,光照度越低,暗态前历效应就越显著。亮态前历效应是光敏电阻在工作前处于亮态,当工作时所受的照度与工作前不同时所出现的一种滞后现象,一般,亮电阻由高照度状态变为低照度状态达到稳定值时所需的时间,比由低照度状态变为高照度状态达到稳定值时所需的时间短。

总之,测试或工作前光敏电阻所处的状态,对光敏电阻特性有影响。具体表现在稳定光照下阻值有明显的漂移现象。一般变化的百分比 β 为

$$\beta = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times 100\% \quad (3-28)$$

6. 时间和频率响应

由光电导效应知,光电导的弛豫时间长,即光敏电阻的时间常数比较大,所以其上限截止频率低。几种光敏电阻的频率特性曲线如图 3-6 所示。由图可知,只有 PbS 光敏电阻的频率特性稍好些,但它的频率响应也不超过 10^4 Hz。

光敏电阻的时间特性与输入光的照度、工作温度有明显的依赖关系。当照度 $E=0.11$ lx 时,光敏电阻的上升时间 $t_r=1.4$ s; 当 $E=10$ lx 时, $t_r=66$ ms; 当 $E=1\ 000$ lx 时, $t_r=6$ ms。

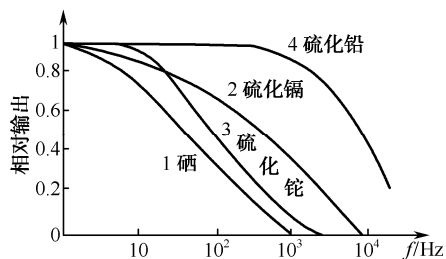


图 3-6 光敏电阻的频率特性曲线

7. 光敏电阻的噪声（热噪声、产生-复合噪声与 $1/f$ 噪声）

产生-复合噪声是载流子的产生率与复合率在某个时间间隔在平均值上下起伏而导致载流子浓度的起伏所产生的均方噪声电流； $1/f$ 噪声也称为闪烁噪声，由于光敏层的微粒不均匀或不必要的微量杂质的存在，当电流流过时，在微粒间发生微火花放电而引起的微电爆脉冲。当其他参数不变时，频率越低，噪声越大，故也称为低频噪声。它属于“红”噪声，相当于白光的红色部分。在不同工作频率下，光敏电阻所表现的主要噪声不同，如图 3-7 所示。当工作频率 f 小于 1 kHz 时，主要为 $1/f$ 噪声；当工作频率 $f \geq 1$ MHz 时，主要是热噪声；当工作频率在这两者之间，即 $1 \text{ kHz} < f < 1 \text{ MHz}$ 时，则主要为产生-复合噪声。但值得指出的是，由于光敏电阻的时间常数大，一般大多工作在低频段，所以主要表现为 $1/f$ 噪声。

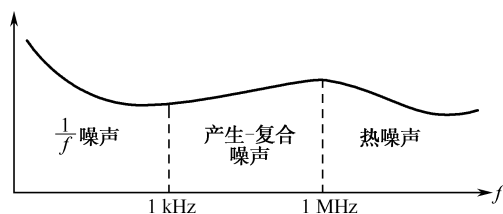


图 3-7 光敏电阻的噪声

3.2.3 光电导型探测器件的使用要点及在安防中的应用

光敏电阻多应用于开关控制、红外检测与弱光检测场合，本节先了解它实际使用应注意的要点，再介绍其在安防中的应用。

1. 光敏电阻的使用要点

在实际使用光敏电阻时，应注意如下使用要点。

(1) 注意所使用光敏电阻的电参数（电压、功耗）的限值，防止使光敏电阻的电参数超过允许值。

(2) 要根据不同用途，选用不同特性的光敏电阻。一般，用于数字信息传输时，选用亮电阻与暗电阻差别大的光敏电阻为宜，且尽量选用光照指数 γ 大的光敏电阻；用于模拟信息传输与测量时，则以选用 γ 值小的光敏电阻为好，因光照指数 γ 与光照强弱有关，只有在弱光照射下光电流与入射辐射通量才成线性关系。

(3) 在设计负载电阻时，应考虑到光敏电阻的额定功耗，通常其负载电阻值不宜很小。



(4) 光敏电阻的光谱特性与温度有关,当温度低时,其灵敏范围和峰值波长都向长波方向移动,因而可采取冷却灵敏面的办法,来提高光敏电阻在长波区的灵敏度。

(5) 光敏电阻的温度特性很复杂,电阻温度系数有正有负,一般说,光敏电阻不适于在高温下使用,特别是杂质光敏电阻在温度高时输出将明显减小,甚至无输出。

(6) 光敏电阻的频带宽度都比较窄,在室温下只有少数品种能超过 1 000 Hz,而且光电增益与带宽之积为一常量,如要求带宽较宽,势必以牺牲灵敏度为代价。

(7) 在用于光度量测试仪器时,必须对光谱特性曲线进行修正,保证其与入眼的光谱光视效率曲线相符合。

(8) 用于光桥测光所用光源的光谱特性,必须注意与光敏电阻的光敏特性匹配。

(9) 要注意防止光敏电阻受杂散光的影响。

(10) 当进行动态设计时,应意识到光敏电阻的前历效应。

2. 光敏电阻作开关控制的应用

(1) 照相机电子快门的自动控制。自动控制曝光时间的照相机的电子快门电路,如图 3-8 所示。当开关 SW 闭合时,快门控制器 DT 的线圈通电使快门打开。通过快门进入相机的光,使胶片感光,也使 R_p (光敏电阻) 值下降对电容 C 充电,三极管 VT_1 导通, VT_2 与 VT_3 也随之导通,使 VT_4 截止,DT 断电而关闭快门。

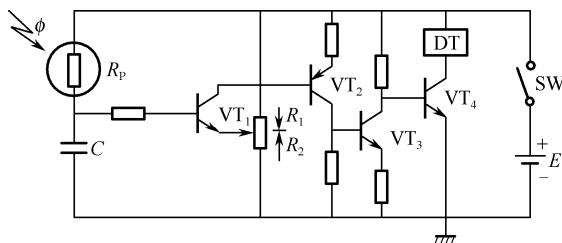


图 3-8 照相机的电子快门电路

(2) 路灯的自动控制。图 3-9 所示为公共场所路灯自动控制电路的一种,有时也和声控电路结合起来共同控制。电路一般由两部分组成:电阻 R 、电容 C 和二极管 VD 组成半波整流滤波电路;CdS 光敏电阻和继电器 J 组成控制电路。路灯接在继电器 J 的常闭触点上。这里使用的是电流继电器,通过的电流必须达到一定值时继电器才能动作。

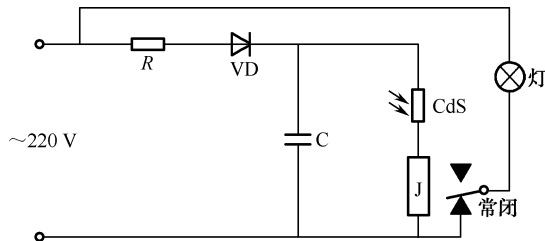


图 3-9 路灯自动控制电路

当光线很弱时,光敏电阻阻值很大,与光敏电阻并联的路灯电阻相对较小,因而流过继电器线圈的电流很小,达不到启动要求,继电器不能工作;电路中的电流几乎全部通过路灯,于是路灯点亮。当环境照度逐渐变大时,光敏电阻阻值逐渐变小,流过继电器线圈的电流逐渐增

大,增大到一定值时,流过继电器的电流足以使继电器 J 动作,动触点由常闭位置跳到常开位置,路灯与电源断开,自动熄灭。

(3) 灯光亮度的自动调节。用光敏电阻作为探测元件的灯光亮度自动调节电路如图 3-10 所示,此电路能根据外界光线强弱自动调节灯光亮度,若外界光亮,灯光就暗;反之灯光就亮。

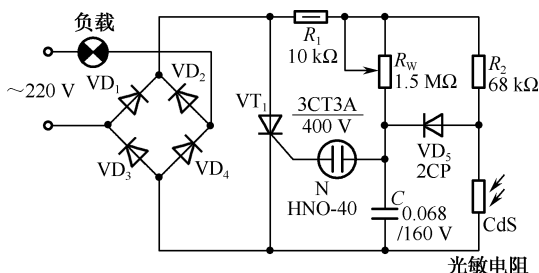


图 3-10 灯光亮度自动调节电路

图中,由晶闸管 VT_1 和二极管 $VD_1 \sim VD_4$ 组成全波相控电路,用氖管 N 作为 VT_1 的触发管。调节 R_w 可改变对电容 C 的充电时间常数,即改变 VT_1 的导通角,控制灯光的亮度。

3. 用光敏电阻作火焰探测报警

图 3-11 所示为采用光敏电阻作为探测元件的火焰探测报警器电路图,图中所用的光电导元件为 PbS 光敏电阻,它的暗电阻的阻值为 $1\text{ M}\Omega$,亮电阻的阻值为 $0.2\text{ M}\Omega$ (辐照度为 1 mW/cm^2 下测试),峰值响应波长为 $2.2\text{ }\mu\text{m}$,恰为火焰的峰值辐射光谱。

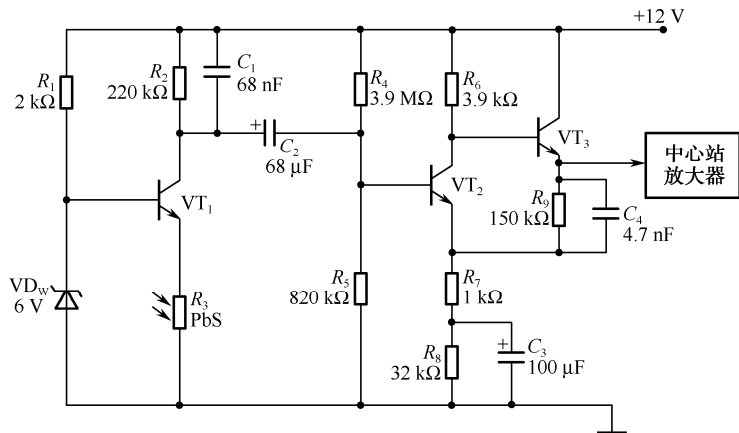


图 3-11 火焰探测报警器电路

从图 3-11 可看到,由 VT_1 、电阻 R_1 、 R_2 和稳压二极管 VD_z 构成对光敏电阻 R_3 的恒压偏置电路。这种恒压偏置电路具有更换光敏电阻方便的特点,只要保证光电导灵敏度 S_g 不变,输出电路的电压灵敏度就不会因为更换光敏电阻的阻值而改变,从而使前置放大器的输出信号稳定。当被探测物体的温度高于燃点或被点燃发生火灾时,物体将发出波长接近于 $2.2\text{ }\mu\text{m}$ 的辐射(或跳变的火焰信号),该辐射光将被 PbS 光敏电阻 R_3 接收,使前置放大器的输出跟随火焰跳变的信号,并经电容 C_2 耦合,送给由 VT_2 、 VT_3 组成的高输入阻抗放大器放大。火焰的跳变信号被放大后送给中心站放大器,并由中心站放大器发出火灾警报信号,或执行灭火动作,如

喷淋出水或灭火泡沫等。

4. 用光敏电阻鉴别物体运动的方向

将两个阻值和性能差不多的光敏电阻安装在物体运动路径的同一侧，相互间隔适当距离。另一侧相对位置分别安装 2 个光源，使物体在光源和光敏电阻之间直线运动。用光敏电阻鉴别物体运动的方向的电路如图 3-12 所示。

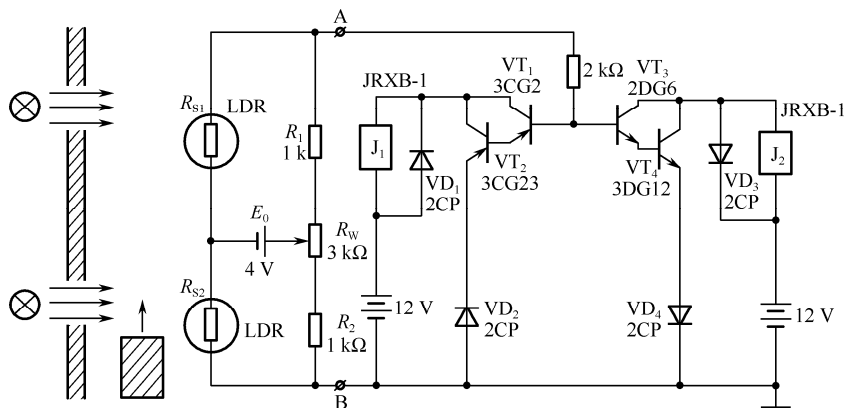


图 3-12 用光敏电阻鉴别物体运动的方向

该电路由电桥和极性判别两部分组成， R_{S1} 、 R_{S2} 、 R_1 、 R_2 、 R_W 组成电桥，由电源 E_0 供电，A、B 端输出。测量前使光敏电阻 R_{S1} 、 R_{S2} 同时遮光或光照，调节 R_W 使电桥平衡， $U_{AB}=0\text{ V}$ 。测量时，当物体由下向上运动时， R_{S2} 首先被遮光，阻值增大； R_{S1} 还被光照，阻值较小，电桥失衡， $U_A>U_B$ ， $U_{AB}>0\text{ V}$ ，则 VT_1 、 VT_2 截止， VT_3 、 VT_4 导通，继电器 J_1 保持断开状态， J_2 吸合。当物体继续向上运动到 R_1 位置时，情况相反， J_1 吸合， J_2 打开。如物体由上向下运动，则与上述情况相反， J_1 先吸合， J_2 后吸合。因此，根据 J_1 与 J_2 吸合的先后顺序即可判断物体的运动方向，并给出了相应的开关控制信号输出。

5. 用光敏电阻使太阳能接收装置四季全天候跟踪太阳

现有的太阳能自动跟踪控制电路无外乎两种：一是使用一只光敏传感器与施密特触发器或单稳态触发器所构成的光控施密特触发器或光控单稳态触发器来控制电机的停、转；二是使用二只光敏传感器与二只比较器分别构成两个光控比较器控制电机的正反转。由于一年四季、早晚和中午环境光和阳光的强弱变化范围都很大，所以上述两种控制器很难使太阳能接收装置四季全天候跟踪太阳。这里所介绍的控制电路也包括两个电压比较器，但设在其输入端的光敏传感器则分别由两只光敏电阻串联交叉组合而成。每一组两只光敏电阻中的一只为比较器的上偏置电阻，另一只为下偏置电阻；一只检测太阳光照，另一只检测环境光照，送至比较器输入端的比较电平始终为两者光照之差。所以，本控制器能使太阳能接收装置四季全天候跟踪太阳，而且调试十分简单，成本也不高。

(1) 使太阳能接收装置四季全天候跟踪太阳的自动跟踪控制电路工作原理。使太阳能接收装置四季全天候跟踪太阳的自动跟踪控制电路原理如图 3-13 所示。

图中，双运放 LM358 与 R_1 、 R_2 构成两个电压比较器，参考电压为 $V_{DD} (+12\text{ V})$ 的 $1/2$ 。光敏电阻 R_{T1} 、 R_{T2} 与电位器 R_{P1} 和光敏电阻 R_{T3} 、 R_{T4} 与电位器 R_{P2} 分别构成光敏传感电路，该

电路的特殊之处在于能根据环境光线的强弱进行自动补偿。如图 3-14 所示, 将 R_{T1} 和 R_{T3} 安装在垂直遮阳板的一侧, R_{T2} 、 R_{T4} 安装在另一侧。当 R_{T1} 、 R_{T2} 、 R_{T3} 、 R_{T4} 同时受环境自然光线作用时, R_{P1} 与 R_{P2} 的中心点电压不变。如果只有 R_{T1} 、 R_{T3} 受太阳光照射, 则 R_{T1} 的内阻减小, LM358 的 3 脚电位升高, 1 脚输出高电平, 三极管 VT_1 饱和导通, 继电器 K_1 通电, 其转换触点 3 与触点 1 闭合, 同时 R_{T3} 内阻减小, LM358 的 5 脚电位下降, K_2 不动作, 其转换触点 3 与触点 2 闭合, 电机 M 正转; 同理, 如只有 R_{T2} 、 R_{T4} 受太阳光照射, 继电器 K_2 导通, K_1 断开, 电机 M 反转。当转到垂直遮阳板两侧面的光照度相同时, 继电器 K_1 、 K_2 都导通, 电机 M 才停转。在太阳不停地偏移过程中, 垂直遮阳板两侧面的光照度的强弱不断地交替变化, 电机 M 转停, 使太阳能接收装置始终面朝太阳。

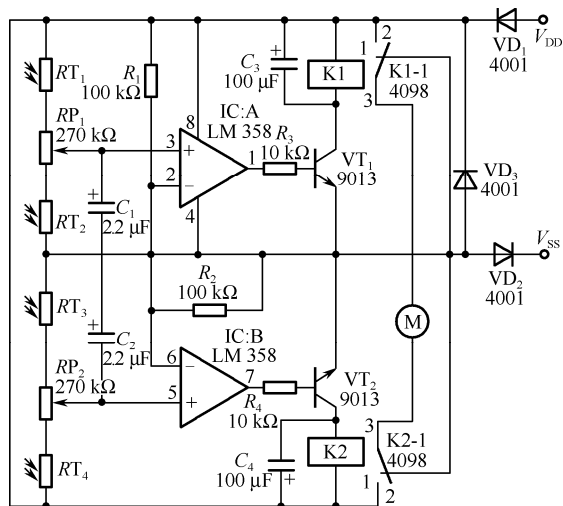


图 3-13 自动跟踪控制电路

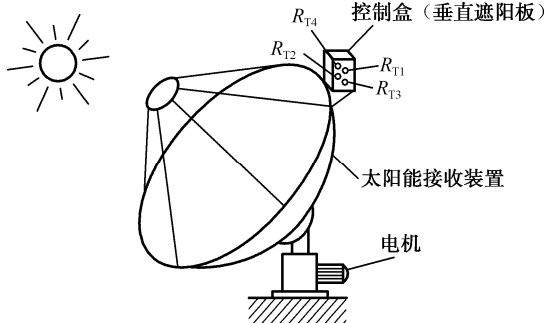


图 3-14 整个太阳能接收装置的结构

4 只光敏电阻这样交叉安排的优点是: LM358 的 3 脚电位升高时, 5 脚电位则降低, LM358 的 5 脚电位升高时, 3 脚电位则降低, 可使电机的正反转工作既干脆又可靠。可直接用安装电路板的外壳兼作垂直遮阳板, 避免将光敏电阻 R_{T2} 、 R_{T3} 引至底荫处的麻烦。

使用该装置, 不必担心第二天早晨太阳升起时, 垂直遮阳板两侧的光照度不可能正好相等, 这样, 上述控制电路就会控制电机, 从而驱动接收装置向东旋转, 直至太阳能接收装置对准太阳为止。

(2) 元器件选择及调试。IC 选择双运放 LM358。 VT_1 、 VT_2 选择 9013 三极管。 $R_{T1} \sim R_{T4}$ 选择 MG44-04 光敏电阻, 其他元件如图 3-13 所示。

整个太阳能接收装置的结构如图 3-14 所示, 兼作垂直遮阳板的外壳最好使用无发射的深颜色材料, 4 只光敏电阻的参数要求一致, 即亮、暗电阻相等且呈线性变化。安装时, 4 只光敏电阻不要凸出外壳的表面, 最好凹进去一点, 以免散射阳光的干扰垂直遮阳板 (即控制盒) 装在接收装置的边缘, 技能随之转动又不受其发射光的强烈照射。调试时, 首先不让太阳直接照到 4 只光敏电阻上, 然后调节 R_{P1} 、 R_{P2} , 使 LM358 两正向输入端的电位相等, 且高于反向输入端 $0.5 \sim 1\text{ V}$ 。调试完毕后, 让阳光照到垂直遮阳板上, 这样接收装置即可自动跟踪太阳了。

6. 用光敏电阻构成进出房间人数计数器

这种计数器可以记录某一时间段内房间内所有来访者的人数。此装置可以安装在诸如电影放映厅、大楼和办公室的入口处，此装置采用简单而常见的计算器来代替专用计数器和显示电路，所以制作成本很低。装置中使用的所有元件都很容易从市场上买到，电路组装、调试也很容易。

(1) 用光敏电阻构成进出房间人数计数器工作原理。两对光电检测装置安装在进出通道上。其中一边，光源 A（发送器）和光敏电阻 LDR₁（接收器）安装在通道进口处；另一边，光源 B（发送器）和光敏电阻 LDR₂（接收器）则安装在通道出口处。光源的两束光线要保持照射在接收器的光敏电阻上，光束要求准确定向。图 3-15 显示了在通道上的光源和接收器的安装位置。

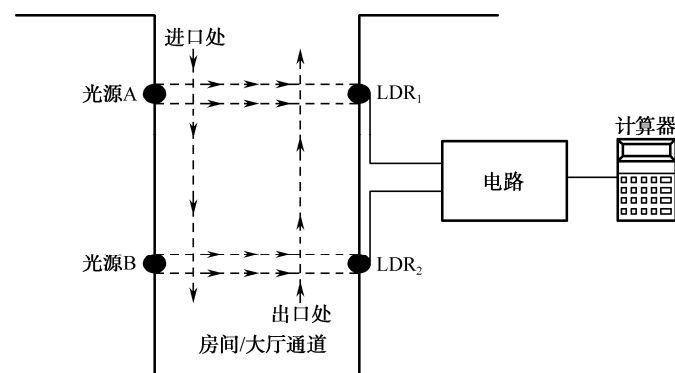


图 3-15 通道上的光源和接收器的安装位置

图 3-16 表示进出房间人数计数器的电路原理。A、B 两个部分是光线检测电路。逻辑控制电路由与门芯片 IC₃、异或门 IC₄ 和触发器 IC₅、IC₆ 为核心组成；定时器 IC₁₁ 和 IC₁₂ 组成延时电路；光耦 IC₇ 和 IC₁₀ 用作计算器与检测电路间的电压隔离。电源电路显示 A、B 部分之间。交流市电通过变压器 X₁ 降为交流 12 V。通过二极管 VD₁~VD₄ 组成的整流器，变为直流。再通过 C₁ 滤波，在稳压电路 IC7809（IC₁）上产生 9 V 稳定电压，加到整个电路上。初加电时，由于电阻 R₅ 和电容 C₃ 和 C₄ 所组成加电复位电路的作用，触发器 IC₅ 和 IC₆ 处于复位状态，从而三极管 VT₃ 和 VT₄ 最初处于截止状态。也就是说：加电时，计算器上的 1、+、- 和 = 键都保持断开状态。由光敏电阻 LDR₁、三极管 VT₁ 和非门 N₁ 以及由光敏电阻 LDR₂、三极管 VT₂ 和与非门 N₂ 分别组成的电路 A、B 两部分检测光线的通、断。然后分别可在与非门 N₁ 的第 3 脚和与非门 N₂ 的第 4 脚上产生一个脉冲。

当没有人通过通道时，光线照射在光敏电阻 LDR₁ 和 LDR₂ 上，使其阻值变低。当 LDR₁ 阻值变低时，晶体管 VT₁ 导通，其集电极电平变低；此低电平送给与非门 N₁，在其第 3 脚上产生一个高电平。由于或非门 N₇ 和 N₈ 的输出为低，使光耦 IC₈ 内部的 LED 处于关闭状态，从而计算机的 + 键触点保持断开。类似地，电阻 LDR₂ 也为低，晶体管 VT₂ 导通，使其集电极为低电平；此低电平信号送给与非门 N₂ 使其输出端第 4 脚为高电平。由于或非门 N₉、N₁₀ 的输出为低，使光耦 IC₃ 内部的 LED 处于关闭状态，从而计算器的 - 键触点保持断开。



图3-16 进出房间人数计数器的电路原理



当有某个人进入房间或大厅的通道,就会依次截断 A、B 两束光线。当光线 A 被遮住时,光敏电阻 LDR_1 的阻值增加, VT_1 截止, N_1 的第 3 脚产生低电平输出。此电平送与门 N_3 和或非门 N_7 和 N_8 ; 由于 N_8 的第 6 脚也为低电平,使 N_8 的输出变高,将 IC_6 (B) 的输出第 1 脚 Q_1 置为高电平。同时 IC_8 被激活,其内部的晶体管接通计算器的+键。当此人继续向前走,光线 B 被遮住时。光敏电阻 LDR_2 的阻值增加, VT_2 截止,在 N_2 的第 4 脚产生低电平输出。由于 IC_6 (B) 处于置位状态,从而使或非门 N_{10} 的输入端第 13 脚也为低电平,使 N_{10} 的输出变高电平。使 IC_6 (A) 置位,其输出 Q_2 (13 脚) 变为高电平,引起晶体管 VT_3 导通; IC_7 被激活,其内部的晶体管接通计算器的 1 键连线。 IC_6 (A) 的输出同时通过晶体管 VT_4 、电容 C_5 、二极管 VD_5 触发单稳态电路 IC_{11} ,在延迟约 1 s 后,进一步触发单稳态电路 IC_{12} 。

IC_{12} 的输出通过晶体管 VT_5 激活 IC_{10} ,使其内部的晶体管接通计算器内的=键。使=键在 1 键按下后约 1 s 后按下。此时与门 N_5 的输出仍然为低,因为其第 8 脚在光线被遮挡期间为低电平。当人从光源 B 移开时,光线再次照到 LDR_2 上,则 N_5 的输出变高,从而使触发器 IC_6 (B) 复位,其输出端 Q_1 (第 2 脚) 变高;进而复位触发器 IC_6 (A),其输出端 Q_2 (第 13 脚) 变低。因此与门 N_5 的输出再次变低,引起晶体管 VT_3 和 VT_4 截止,使计算器的 1 和=键被释放。这样,电路在顺序按下+、1、=键之后,恢复初始状态,并且准备好另一次计算。

上述说明可以概括如下:当某人进入通道,依次截断 LDR_1 和 LDR_2 两束光线时,计算器上的+、1、=键被自动顺序按下,实现在计算器上的总计数值上加 1,表示有 1 个人进入房间。

如果有人离开房间,首先会遮断光线 B,然后才遮断光线 A。当光线 B 被遮断时, LDR_2 的阻值增加,在 N_2 的第 4 脚上产生低电平输出;此电平送给与门 N_6 、或非门 N_9 和 N_{10} ,由于 N_9 的第 9 脚最初为低,所以其输出变高电平,位置 IC_5 (B),从而激活 IC_9 ,使其内部晶体管短接计算机-键的触点。而当此人越过光源 B 而遮断光线 A 时, LDR_1 的电阻增加,在与非门 N_1 输出的第 3 脚产生低电平,同时由于 IC_5 (B) 在置位状态, N_7 的第 2 脚为低电平,故 N_7 的输出变高。从而使 IC_5 (A) 置位,其 Q_1 (1 脚) 变高。进而引起晶体管 VT_3 导通,激活 IC_7 。其内部晶体管短接计算机的 1 键。 IC_5 (A) 的高电平输出通过晶体管 VT_4 、电容 C_5 和二极管 VD_5 触发单稳电路 IC_{11} ,在延时 1 s 后触发 IC_{12} 。 IC_{12} 的输出通过晶体管 VT_5 激活 IC_{10} ,其内部晶体管短接计算机=键的触点。使=键在 1 键按下后约 1 s 后按下。在光线 A 被遮期间,与门 N_4 由于其第 5 脚保持低电平,故其输出为低。而当人通过后,光线再次照到 LDR_1 上时, N_4 的输出变高;从而复位 IC_5 (B),其 Q_2 输出 (脚 12) 高电位,进而复位触发器 IC_5 (A),使其 Q_1 的输出 (1 脚) 变低。因此使与门 N_4 的输出再次变低。从而使得晶体管 VT_3 和 VT_4 停止导通。按计算机的 1 键和=键释放,电路恢复其初始状态。

总之,当 LDR_2 的光线先遮断, LDR_1 的光线后被遮断时,计算机自动顺序按下:-、1、=键。从计算机的总计数中减 1,指示有一个人离开了房间。因此,在任何时候,逗留在房间或大厅内的总人数都会显示在计算器的显示屏上。

(2) 元器件选择及调试。 IC_1 选 7809、9 V 稳压器; IC_2 选择 CD4093,是 2 输入触发器, IC_3 选择 CD4081,是 2 输入与门, IC_4 选择 CD4001,是 2 输入异或门, IC_5 、 IC_6 选择 CD4031,是 D 触发器, $IC_7 \sim IC_{10}$ 选择 MCT2E 光电耦合器, IC_{11} 、 IC_{12} 选择 NE555 定时器。 $VT_1 \sim VT_5$ 选择 BC547NPN 管。 $VD_1 \sim VD_4$ 选择 1N4001 整流管, VD_5 、 VD_6 选择 1N4148 开关二极管。 LDR_1 、 LDR_2 为光敏电阻。电阻均为 $(1/4)$ W、 $\pm 5\%$ 规格。

焊接好电路后,再连接到各种简单的计算机上。为实现连接,需打开计算机,在+、-、1、=键的触点上焊接好的连接线,然后在计算器背面打孔,将引线穿出。用数字万用表测量一下

从1键所引出导线上的电压,判断其极性。将负极导线接到光耦 IC₇ 的发射极(第4脚)上,将正极引线接到集电极(第5脚)上。类似地找出+、-、=键的引线极性,分别连接到光耦合 IC₈、IC₉、IC₁₀ 上。将系统安装在需监控来访人数的大厅或房间的入口处,可用9V电池作备用电源。测试电路时,将LDR暴露在同样强的光线下。接通电源,测量晶体管 VT₁ 的集电极与地之间的电压,如超过5V,就调整电位器 VR₁,将其设置约1V(或低于1V)。再遮住光线,再次测量电压,如低于5V,调 VR₁ 使到5V以上。

对于200k Ω 的 VR₁,光敏电阻 LDR 在未被照亮时的阻值应比照亮时高出约100k Ω 。在不亮状态,电阻约为10k Ω 。如做不到,就需改变 VR₁ 的值。接着按上述同样方法检测 VT₂。调整完毕,关闭电路电源,在5~10s后再打开。现打开计算机电源,按下 AC(全清除)键,显示器将显示0。快速地遮断光线 A,再遮断光线 B。当光线 B 路径上的障碍清除后,计算机将显示1。重复此过程,计算机显示由1增至2。每次先遮断光线 A 再遮断 B,都会使显示增加1,表示上行计数工作正常。

为测试下行计数,按下 AC(全清除)键,显示器将显示0。快速地遮断光线 B,再遮断光线 A。当光线 A 路径上的障碍清除后,计算机将显示-1。重复此过程,计算机显示由-1变为-2,表示有2个人离开了房间。每次先遮断光线 B 再遮断 A,都会使显示减1,表示下行计数工作正常。如不正常,检查连接是否正确等。

为防止周围环境光线的干扰,LDR 必须装入一个朝向光源的黑色管子中,集成电路最好安装在插座上,焊好后再插上 IC。连接到计算器上的引线最好是带有焊接头的质量好的线。

7. 用光敏电阻作红外检测与弱光检测

(1) 光敏电阻的光谱响应比光伏器件宽,尤其在红外波段,如 PbS 光敏电阻的光谱响应范围为400~2800nm,因而适于作红外检测,如常用于火点探测与火灾预/报警系统。

(2) 由于光敏电阻有灵敏度高、工作电流大(达数mA)的特点,因而光敏电阻有对微弱辐射的探测能力。虽然,光敏电阻的光电特性不像光伏器件线性好,但在很低照度下呈线性,且灵敏度高,因而适合用于弱光检测。

(3) 由于 CdS 光敏电阻的感光特性与人眼最接近,因而适于照相机曝光表与空气烟尘检测器等可见光装置。

3.3 半导体光伏型探测器件及其在安防中的应用

半导体光伏型探测器件(PV器件)也称为结型器件,它是少数载流子导电的光生伏特效应器件,如光电池、光电二极管(或光敏二极管)与光电三极管(或光敏三极管)等。显然,它们与多数载流子导电的光电导型器件(PC器件)有很大差别,如响应速度快、线性好、暗电流小、噪声低、受温度影响小等是光电导型器件无法比拟的。两者的具体区别主要体现在如下6个方面。

(1) 产生光电变换的部位不同。光敏电阻不管哪一部分受光,其受光部分的电导率就增大,是一种多数载流子的光电导效应;而结型器件,只有照射到 PN 结区或结区附近的光才能产生非平衡载流子,是一种少数载流子的光生伏特效应。光在其他部位产生的非平衡载流子,大部分在扩散中被复合掉,只有少部分通过结区,但又被结电场所分离,因此对光电流基本上没有贡献。



(2) 器件连接不同。光敏电阻没有极性,因而使用方便,可任意外加电压;而结型光电器件则有确定的正负极性,不能接错,但光电池可在没有外加电压下也可把光信号转换成电信号。

(3) 响应时间与频率特性不同。光敏电阻的光电导效应主要依赖于载流子的产生与复合运动,时间常数较大,频率响应较差;而结型器件的电场主要加在结区,其光电效应主要依赖于结区的非平衡载流子的运动,弛豫过程的时间常数相应较小,因此响应速度较快。

(4) 工作电流与灵敏度不同。光敏电阻有灵敏度高、工作电流大(达数 mA)的特点;而结型器件一般较小,但光电二极管、雪崩光电二极管等有较强的内增益作用,因此灵敏度也较高,也可以通过较大的电流。

(5) 光谱响应与光电线性不同。光敏电阻有对微弱辐射的探测能力与光谱响应宽的特点。因为光敏电阻的光电特性不像光伏器件线性好而为非线性,但在很低照度下呈线性,且灵敏度高,因而有对微弱辐射的探测能力;并且光敏电阻的光谱响应比光伏器件宽,尤其在红外波段,如 PbS 光敏电阻的光谱响应范围为 400~2 800 nm,因而常用于火点探测与火灾预/报警系统。

(6) 应用场合不同。CdS 光敏电阻的感光特性与人眼最接近,适于作照相机曝光表与空气烟尘检测器等可见光装置;光敏二极管与三极管的最佳响应特性在近红外区,适于红外遥控、红外光束阻断报警器等装置。

3.3.1 光电池

1. 光电池的结构原理与类型

光电池是一种最简单的光伏型器件,目前应用较多的有硒光电池、硅光电池、薄膜光电池、紫光电池和异质结光电池。硒光电池因光谱特性与人眼视觉很相近,频谱较宽,故多用于曝光表及照度计;硅光电池与其他半导体光电池相比,是目前转换效率最高的(已过 17%);薄膜光电池是把硫化镉等材料制成薄膜结构,以减轻质量、简化阵列结构,提高抗辐射能力和降低成本;紫光电池是把硅光电池的 PN 结减薄至结深为 0.2~0.3 μm ,光谱响应峰值移到 600 nm 左右,来提高短波响应,以适应外层空间使用;异质结光电池入射光几乎全透过宽带材料一侧,而在结区窄禁带材料中被吸收产生电子-空穴对,以提高入射光的收集效率,获得高于同质结硅光电池的转换效率,理论上最大可达 30%。

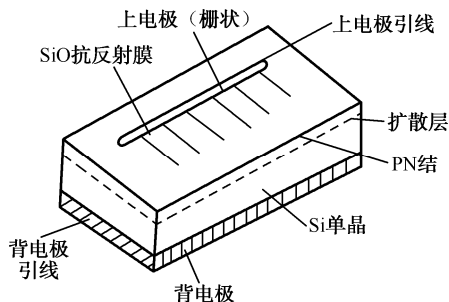


图 3-17 硅光电池结构示意图

光电池的原理是基于一个 PN 结的光生伏特效应,一般做成面积较大的薄片状,来接收更多的入射光。图 3-17 是硅光电池结构示意图,它是用单晶硅组成的。国产同质结硅光电池因衬底材料导电类型不同而分成 2CR 型与 2DR 型两类。2CR 型硅光电池,是在一块以 N 型硅作衬底的硅片上,扩散 P 型杂质(如硼),形成一个扩散 P^+N 结, P 型杂质为受光面; 2DR 型硅光电池,是在一块以 P 型硅作衬底的硅片上,扩散 N 型杂质(如磷),形成一个扩散 N^+P 结。一般,用做光电探测器的多为 P^+N 型,即 2CR 型。 N^+P 型硅光电池具有较强的抗辐射能力,适合空间应用,作为航天的太阳能电池,即 2DR 型。

2. 光电池的特性参数

(1) 输出特性。PN 结光电池伏安特性曲线在无光照时与普通半导体二极管相同，有光照时沿电流轴方向平移。平移幅度与光照度成正比，如图 3-18 所示。曲线与电压轴的交点称为开路电压 U_{oc} ，与电流轴的交点称为短路电流 I_{sc} 。图 3-19 是光电池的等效电路。

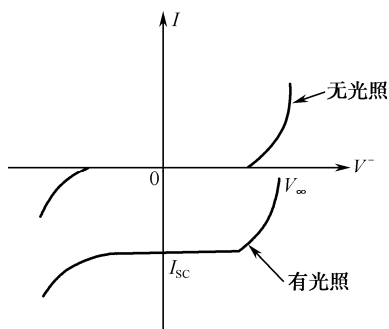


图 3-18 光电池伏安特性曲线

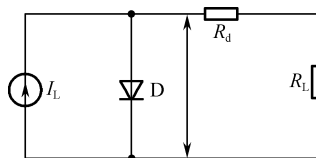


图 3-19 光电池等效电路

其伏安特性曲线方程为

$$I = I_L - I_s [e^{q(U - IR)/kT} - 1] \quad (3-29)$$

式中， q 为电子电荷量； k 为玻耳兹曼常量； T 为热力学温度； U 为光电池输出电压； I_L 为光电池等效电路中的恒流源； I_s 为光电池等效二极管反向饱和电流； R_d 为光电池等效电路中串联电阻（内阻）。通常， R_d 很小，可忽略，则式 (3-29) 变为

$$I = I_L - I_s (e^{qU/kT} - 1) \quad (3-30)$$

式中，第一项为光电流，第二项为普通二极管表达式，其中

$$I_L = SL \quad (3-31)$$

式中， S 为光电灵敏度 ($\mu A/lx$ 或 mA/mW)； L 为入射光强度 (lx 或 mW)。由式 (3-30) 可知，当 $I=0$ 时，得到开路电压为

$$U_{oc} = kT/q \cdot \ln(I_L/I_s + 1) \quad (3-32)$$

当 $U=0$ 时，得到短路电流为

$$I_{sc} = I_L = SL \quad (3-33)$$

从式 (3-33) 可以看出， I_{sc} 与光照强度成正比，而从式 (3-32) 来看，由于 $I_L \gg I_s$ ，故 $I_L/I_s \gg 1$ ，因而

$$U_{oc} \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_L}{I_s} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_s} = \frac{kT}{q} \ln \frac{SL}{I_s} \quad (3-34)$$

从式 (3-34) 可看出， U_{oc} 与入射光强度的对数成正比。在同一片光电池上，当光照强度一定时， I_{sc} 与受光面积成正比， U_{oc} 与受光面积的对数成正比。把光电池用于探测器时，通常以电流源形式使用。实际使用时都外接有负载电阻 R_L ，当 R_L 相比光电池内阻 R_d 要小时，可以认为接近于短路。当光电池用作为探测器时，为保持光电流和光强的线性关系，可选取合适的负载。不言而喻，负载电阻越小，线性度越好，且线性范围越广，如图 3-20 所示。

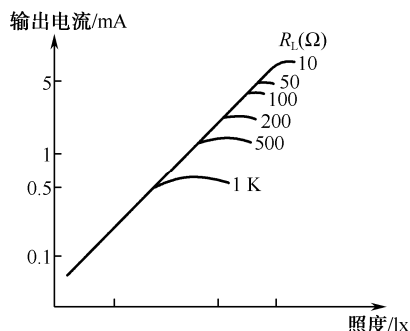


图 3-20 输出电流与照度关系

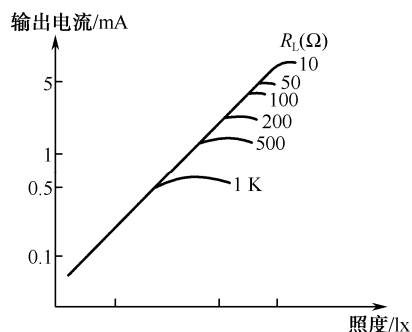


图 3-21 输出电压 U_{Ls} 、输出电流 I_{Ls} 、输出功率 P_L 随负载电阻 R_L 变化关系曲线

当光电池两端接负载 R_L 时，设流过 R_L 的电流为 I_{Ls} ，其上的电压降为 U_{Ls} ，则 R_L 上产生的电功率为 $P_L = U_{Ls} I_{Ls}$ 。 P_L 与入射光功率之比称为光电池的转换效率 η 。图 3-21 示出了输出电压 U_{Ls} 、输出电流 I_{Ls} 、输出功率 P_L 随负载 R_L 变化关系的曲线。由图 3-21 看出， U_{Ls} 随 R_L 加大而升高。当 R_L 为 ∞ 时， U_{Ls} 等于开路电压 U_{oc} ； R_L 为低阻时， I_{Ls} 趋近于短路电流 I_{sc} ，当 $R_L = 0$ 时， $I_{Ls} = I_{sc}$ 。随着 R_L 变化，输出功率 P_L 也变化；当 $R_L = R_M$ 时， P_L 为最大值 P_M ，即在负载电阻上获得最大功率输出，此时的负载电阻 R_M 称为最佳负载电阻。但值得注意的是，即使对同一光电池，如光照度不同， R_M 也会不同。

光电池的伏安特性曲线如图 3-22 所示，它可表示出输出功率的大小。 R_L 负载线就是过原点斜率为 $\tan\theta = I_L/U_L = 1/R_L$ 的直线，该直线与特性曲线交于 P_L 点， P_L 点在 I 轴和 U 轴上投影为输出电流 I_L 和输出电压 U_L ，输出功率 P_L 等于矩形 $OL_P U_L$ 的面积。若过 U_{oc} 和 I_{sc} 作特性曲线的切线，它们相交于 P_Q 点，连接 P_Q 点和原点 O 的直线即为最佳负载线，此直线与特性曲线交于 P_M ，最大输出功率 P_M 等于矩形 $OL_M P_M U_M$ 面积，此时流过负载 R_M 上的电流为 I_M ， R_M 上的压降为 U_M 。

(2) 光谱特性。硅光电池的光谱响应范围为 $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ ，峰值波长为 $0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 。硒光电池的光谱响应范围为 $0.34 \sim 0.75 \mu\text{m}$ ，峰值波长为 $0.54 \mu\text{m}$ 。光电池光谱范围的长波阈取决于材料的禁带宽度，短波阈受材料表面反射损失的限制，其峰值波长不仅和材料有关，而且随制造工艺及使用环境温度不同而有所不同。

(3) 温度特性。光电池的温度特性曲线是描述 U_{oc} 及 I_{sc} 随温度变化情况，如图 3-23 所示。随着温度的升高，硅光电池的光谱响应向长波方向移动，开路电压 U_{oc} 将下降。短路电流 I_{sc} 略有上升。国产硅光电池的温度特性为温度每升高 1°C ， U_{oc} 下降 $2 \sim 3 \text{ mV}$ ， I_{sc} 约上升 $78 \mu\text{A}$ 。当光电池作为检测器件使用时，就应考虑这种温度漂移而进行补偿，以保证测量精度。还应注意的是，当温度升高，转换效率就略有下降，这是对作为换能器的光电池所应考虑的。

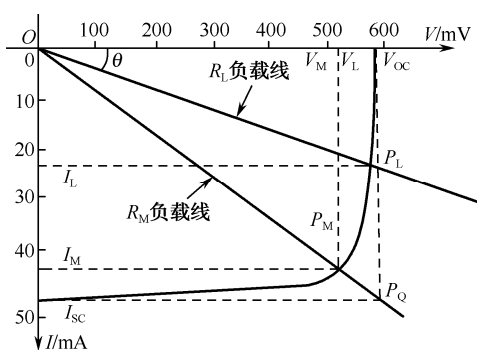


图 3-22 光电池的伏安特性

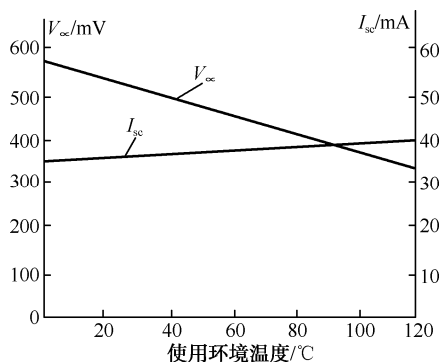


图 3-23 光电池的温度特性

(4) 频率特性。光电池的响应时间由 PN 结电容和负载电阻 R_L 的乘积决定，而结电容与器件面积成正比，故在要求较高频率特性的探测电路中，宜选用小面积的光电池较为有利。显然，如果负载选择得当，可以获得较高的频率特性。

3. 光电池的应用

光电池的应用主要有以下两个方面。

(1) 利用光电池作为探测器件。光电池有着光敏面积大, 频率响应高, 光电流随照度线性变化等特点。因此, 它既可作为光电开关应用, 也可用于线性测量。它可按不同测量要求特制, 如光栅测量中使用的四等分硅光电池组; 还有把光电池制成两个对称半圆式、四象限式, 其单片电池参数相差在 10% 以内, 后续适用于差分放大电路。此外它还用在光电读数、激光准直、电影还音等装置上。

(2) 利用光电池将太阳能转变成电能。目前硅光电池能耐较强的辐射, 转换效率较其他光电池高。为提高其功率, 可将硅光电池单体经串与并联组成阵列结构。如单体经串联达到所需电源的电压、并联达到所需电源的电流, 然后组成一个太阳电池组。在实用中, 多与镍镉蓄电池配合, 白天利用太阳能量给蓄电池充电, 夜晚则由蓄电池供电。目前, 多用它作为人造卫星、飞船、野外微波站、野外灯塔、海上与江河上的航标灯、无人气象站等无输电线路地区的电源供给。

3.3.2 光敏二极管

1. 光敏二极管的结构原理与类型

光敏二极管和光电池的基本结构都是一个 PN 结, 也是基于光生伏特效应原理工作的。但它与光电池的不同是:

- (1) 结面积比光电池小, 因而输出电流普遍比光电池小, 一般在数 μA 到数十 μA 。
- (2) 电阻率比光电池高 ($1\,000\ \Omega/\text{cm}$), 而光电池仅 $0.1\sim 0.01\ \Omega/\text{cm}$ 。
- (3) 制作衬底材料的掺杂浓度比光电池低 ($10^{12}\sim 10^{13}$ 原子数/ cm^3), 而光电池为 $10^{16}\sim 10^{19}$ 原子数/ cm^3 。
- (4) 全在反向偏置电压下工作, 而光电池多工作在零偏。由于半导体硅的温度系数小, 工艺最成熟, 因此实际中多使用硅光敏二极管。

光敏二极管与普通二极管相比, 也有一个 PN 结, 也属单向导电性的非线性元件。但光敏二极管在结构上特殊, 如图 3-24 所示。为了获得尽可能大的光生电流, 需要较大的工作面, 即 PN 结面积比普通二极管要大得多, 且通常都以扩散层作为它的受光面, 为此受光面上的电极做得较小; 为了提高光电转换能力, PN 结的深度较普通二极管浅; 为了保证管子的稳定性、减小暗电流和防止光线的反射, 在表面上还必须用二氧化硅作保护。

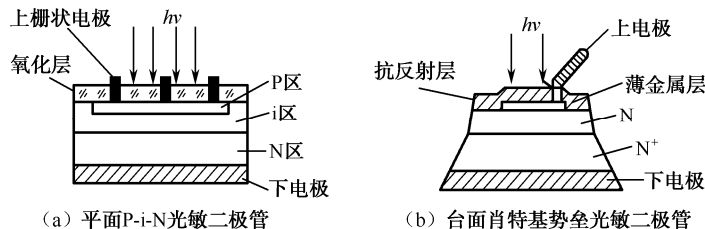


图 3-24 典型光敏二极管结构

国产硅光敏二极管按衬底材料的导电类型不同, 分为 2CU 与 2DU 两种类型。2CU 型以 N-



Si 为衬底, 而 2DU 型则以 P-Si 为衬底。2CU 型光敏二极管只有二个引出线, 而 2DU 型则有三个引出线, 因为除了前级和后级以外, 还设有一个环极。加环极的目的是为了减少暗电流和噪声。因为 2DU 型是以 P-Si 为衬底, 在二氧化硅保护膜中常含有少量的钠、钾、氢等正离子, 它们的静电感应可使 P-Si 表面产生一个感应电子层, 可使 P-Si 表面与 N-Si 连通。这样, 当管子加反偏压时, 从前级流出的暗电流除 PN 结的反向漏电流外, 增加了表面感应层产生的漏电流。如设置一个 N^+ -Si 的环极把受光面 N-Si 包围起来, 为这个感应电子层的漏电流提供一条不经过负载即可达到电源的通路, 从而减小了流过负载的暗电流, 也减小了噪声。而 2CU 型以 N-Si 为衬底, 在它的表面产生不了电子感应层, 因而就不需要加环极。

2. 光敏二极管的特性参数

(1) 势垒区的厚度与电容。光敏二极管的重要工作区是势垒区, 其厚度对光敏二极管的特性有着非常重要的影响。只要知道 P 区和 N 区的电荷分布, 根据泊松方程, 即可确定势垒区的电势降落和耗尽层的厚度

$$W = (2\varepsilon\mu_n\rho_n U)^{1/2} \quad (3-35)$$

式中, ρ_n 为 N 型区的电阻率; μ_n 为 N 型区的电子的迁移率; ε 为介电常数; U 为外加电压。此时, 我们可以求得面积为 A 的耗尽区电容 C_j 为

$$C_j = A \left(\frac{\varepsilon}{2\rho_n\mu_n U} \right)^{1/2} \quad (3-36)$$

由于基体杂质浓度 $N \propto 1/\rho_n$, 所以式 (2-36) 可用更简单的形式表示, 即

$$C_j \propto \sqrt{N/U} \quad (3-37)$$

由此可知, 越低的基体掺杂 N 和越高的反向电压 U , 可得到较低的势垒电容 (结电容)。

(2) 光谱响应。图 3-25 是三种典型的光敏二极管的相对光谱响应曲线。由图可看出, 它们的光谱响应从可见光一直延伸到近红外 (硅为 $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$), 且在 $0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 波段的响应最高, 正好与砷化镓发光二极管或激光二极管的工作波长相匹配, 而且对红光也有较高的灵敏度。

(3) 光敏二极管的输出特性。光敏二极管在反向偏压下的伏安特性如图 3-26 所示, 曲线与纵坐标的交点即为零偏压时的光生电流。由图可见, 在低反向电压下, 光电流随电压的变化比较敏感。因为反向电压的施加, 加大了耗尽层的宽度及电场强度, 提高了光吸收效率及对载流子的收集系数。当反向电压进一步加大, 对光生载流子的收集达到极限, 光生电流趋向于饱和。此时, 可视为恒流源, 光生电流与所加的反向电压几乎无关, 它仅取决于入射的光照强度。

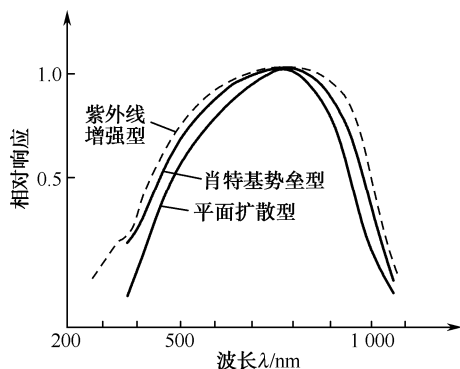


图 3-25 典型光敏二极管光谱响应

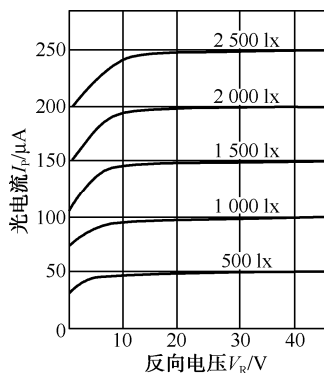


图 3-26 光敏二极管伏安特性

光敏二极管在较小的负载电阻下,光电流与入射光照度成正比,表现出非常好的线性。一般,硅光敏二极管的电流灵敏度,多在 $0.4\sim 0.5\ \mu\text{A}/\mu\text{W}$ 数量级。

(4) 光敏二极管的频率响应。主要由载流子的渡越时间和 RC 时间常数来决定。

① 载流子的渡越时间。无论是光生载流子向结区扩散,还是结电场中载流子的漂移,它们都有一定的弛豫时间,这个弛豫时间影响着光敏器件的频率响应。若暂时不考虑 RC 时间常数的影响,则二极管的频率响应由扩散与漂移两者中弛豫时间较长者来决定。

$$\tau_{\text{漂移}} = \frac{W_j}{2.8V_s}; \quad \tau_{\text{扩散}} = \frac{W_p}{2.43D_n} \leq \frac{W_p}{2.43V_s} \quad (3-38)$$

式中, W_j 为耗尽层厚度; W_p 为 P 区厚度; D_n 为 P 区电子的扩散系数; V_s 为结电场中电子的饱和和漂移速度(硅的 $V_s \approx 5 \times 10^6\ \text{cm/s}$)。

一般,对于扩散型 PN 结光敏二极管的频率响应,主要由结两侧一个少子扩散长度范围内的区域中,光生少子扩散至结区所需的扩散时间来决定。而对于耗尽层型光敏二极管的频率响应,主要由光生少子在结区的漂移时间来决定。对不同波长的光,器件也有不同的频率响应,这对于扩散型 PN 结,光敏二极管尤为突出。波长越长的光在较深处被吸收,产生的少数载流子远离 PN 结,需较长的扩散时间才能被收集。而较短波长的光在靠近表面处被吸收,产生的少数载流子离结很近,它的扩散时间也就很短。正是由于这种原因,以耗尽区为主要工作区的光敏二极管优于这种扩散型的 PN 结光敏二极管。

② RC 时间常数。图 3-27 为光敏二极管等效电路,其中 R_{sh} 为泄漏电阻, R_s 为串联电阻。图中与 R_{sh} 并联的电容 C_j 为结电容,有时也称为耗尽层电容。在高频情况下,由于 C_j 形成的阻抗远小于 R_{sh} , 所以,图 3-27 (a) 可以简化为图 3-27 (b) 的形式。这样, RC 时间常数为

$$R_s C_j = 1/\omega_c \quad (3-39)$$

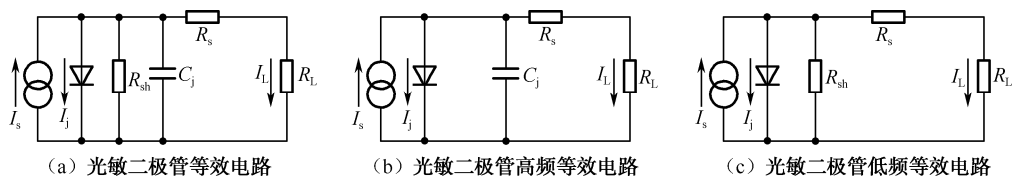


图 3-27 光敏二极管等效电路

如果不考虑渡越时间对频率的影响,则 ω_c 就决定了器件的频率响应。在实际使用中,时间常数中的 R 应包括负载在内, C 还与分布电容有关。

由式 (3-36) 与式 (3-39) 可看出,要有好的频率响应,还必须做到:

- 合理的结面积(小的结面积可使 C_j 减小,但相同光照下,光电流也较小)。
- 尽可能大的耗尽层厚度。
- 适当加大使用电压(因为加大反向偏压将扩大耗尽层,从而减小了结电容)。
- 减小结构所造成的分布电容。

实际上,由于光敏二极管的结电容很小,它的频率响应很高,其带宽可达 $100\ \text{kHz}$ 以上。

(5) 光敏二极管的温度特性。由于反向饱和电流对温度的强烈依赖性,光敏二极管的暗电流对温度的变化非常敏感,其光生电流与电压随温度的变化如图 3-28 所示。显然,与硅光电池一样,短路电流的变化率远小于开路电压的变化率,因此为了取得很好的温度特性,光敏二极管也应在较小的负载下使用。

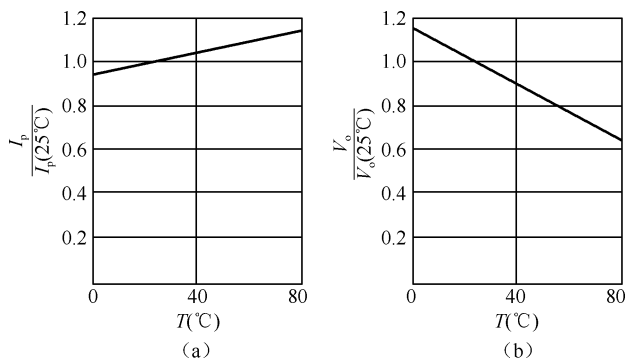


图 3-28 光敏二极管光生电流与电压随温度的变化

(6) 光敏二极管的噪声。主要是由电流在半导体内的散粒效应引起的散粒噪声。而光敏二极管的电流应包括暗电流 I_d 、信号电流 I_s 与背景辐射引起的背景光电流 I_b ，因此光敏二极管的散粒噪声应为

$$\overline{I_{Nsh}^2} = 2q(I_d + I_s + I_b)\Delta f \quad (3-40)$$

需要指出的是，光敏二极管自身的电流噪声比负载电阻和后接放大器的噪声要小得多，因此光敏二极管的探测能力常受负载电阻和放大器噪声的限制。

3. 光敏二极管的类型

光敏二极管的种类很多，就材料来分，有锗、硅制作的光敏二极管，也有 III-V 族化合物及其他化合物制作的二极管。从结特性来分，有 PN 结、PIN 结、异质结、肖特基势垒型及点接触型等。从对光的响应来分，有用于紫外、可见及红外等种类。不同种类的光敏二极管，具有不同的性能。例如，锗光敏二极管比硅光敏二极管在红外光区域有更大的灵敏度，这是由于锗材料的禁带宽度较硅小，其本征吸收限处于红外。因此，在近红外应用，锗光敏二极管有较大的电流输出，但它比硅光敏二极管有较大的反向暗电流，因此它的噪声较大。又如，PIN 型或雪崩型光敏二极管与扩散型 PN 结光敏二极管相比，具有很短的时间响应等。因此，了解光敏二极管的类型及性能，就可以在使用中进行合理的挑选。

(1) 扩散型 PN 结光敏二极管。即指耗尽层厚度比结的任何一边的扩散长度要小的二极管，它的工作区主要是结两边的扩散区，因此对光生电流的贡献主要是扩散流，而不是漂移流。由于扩散过程中的复合，使复合区产生的噪声较耗尽层型探测器的散粒噪声要大得多。此外，有外加电压时，两个扩散区内都出现一定的少数载流子积累，而且它的浓度随电压的变化而变化，这样就造成了一个附加的电容效应，它限制了扩散型 PN 结光敏二极管的频率响应特性。对于这种结的截止频率 f_c ，其近似表示式为

$$f_c = 0.4D/W^2 \quad (3-41)$$

式中， D 为基体少数载流子的扩散系数； W 为扩散区宽度。

改变杂质分布，使光照面附近产生一个增强的电场，频率响应会得到一定的改善。这就是缓变型 PN 结，但它的响应始终不如耗尽层型光敏二极管。

(2) 耗尽层型光敏二极管。又称为肖特基势垒光敏二极管，即金属和半导体接触形成的阻挡层（肖特基势垒）。这是指耗尽区比结的任一边的扩散长度大的管子，它的光电转换区域主要是在耗尽层内，光电流主要是由漂移电流引起的，这种管子响应时间短，有很高的频率响应，

可探测 5~10 ns 的光脉冲信号,且量子效率高。

作为高频光电探测器的设计参数,半导体对光的吸收系数 α 和耗尽层厚度 W 极为重要。为了来自基体的较慢的扩散流减至最小,必须使 $W>1/\alpha$ 。同时,小的耗尽层电容也需要有大的 W 。但是,如果 W 太大,高频响应反而会由于载流子的渡越时间(主要是漂移时间)而受到限制。在高电场中,电子的渡越时间为 W/V_s 。那么,截止频率 f_c 为

$$f_c = V_s / W \quad (3-42)$$

式中, V_s 为电子饱和漂移速度。对纯电阻性负载而言,有 $RC\omega_c=1$,这时会出现因 RC 时间常数所致的高频截止 ω_c 。耗尽层电容为

$$C = \epsilon A / W \quad (3-43)$$

串联电阻 R 为

$$R = l \rho / A \quad (3-44)$$

式中, ρ 为基体材料电阻率; l 为除耗尽层以外的基体材料的厚度。实际上, R 还应包括薄层电阻肖特基势垒中的薄金属层和接触电阻。但由于这种二极管基体的电阻率较高,因此主要考虑基体材料所形成的欧姆电阻。根据 $RC\omega_c=1$,结合式(3-43)与式(3-44)就可以得到截止频率 ω_c 为

$$\omega_c = W / (l \epsilon \rho) \quad (3-45)$$

由式(3-43)和式(3-45)看出,当选取的 W 为

$$W = \sqrt{2\pi\epsilon\rho l V_s} \quad (3-46)$$

时,就会有一个最佳的截止频率。这种二极管的主要优点是,在0.4~0.6 μm 波段的灵敏度高于一般的硅光电二极管,其光敏面可以做得很大,且均匀性好,动态范围大,因而很适于四象限探测器,用于激光跟踪、定位、侦察、制导等系统。此外,用它做成的CCD混合焦平面阵列,其均匀性比一般红外探测器焦平面阵列均匀性高100倍以上,有利于提高系统的性能。

(3) 异质结光敏二极管。若将禁带宽度 E_g 不同的两种半导体材料做成异质PN结,即可构成异质结光敏二极管。通常,以 E_g 大的材料作为光接收面,如用 E_g 大的N-GaAs与P-Ge构成的异质结光敏二极管,当有光照时,能量大于N-GaAs的 E_g 的光子将被GaAs吸收,若GaAs材料厚度大于光生载流子的扩散长度时,则能量大于N-GaAs的 E_g 的短波光子的电子-空穴对将不能到达结区,因而对光电流没有贡献。而能量小于N-GaAs的 E_g 的长波光子的光子能够通过GaAs材料而在P-Ge中被吸收而产生光电流。因此,异质结光敏二极管的宽禁带材料起着滤波作用,即把波长 $\lambda \leq 1.24/E_{gm}$ (μm)的短波成分滤掉(E_{gm} 是宽禁带材料的禁带宽度)。这种异质结光敏二极管又称窄带自滤波探测器,它的光谱响应半宽度 $\Delta\lambda$ 很窄,能较好地抑制背景噪声,所以异质结光敏二极管具有背景噪声低、量子效率高、信号均匀等特点,因而有广阔的应用前景。

采用III~V族化合物半导体如 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 等固溶体三元系或四元系材料制成的异质结光敏二极管,可工作于1~1.6 μm 波段,是光纤通信的理想探测器。这种器件还可通过改变组分 x 来调节光谱响应范围,如InGaAsP系列异质结探测器,其峰值响应波长为1.06~1.2 μm ,长波限达1.35 μm ,量子效率达45%~70%,暗电流1~5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$,响应时间可从几个ns到几十ps量级,是响应速度非常快的器件。利用GaAs液相外延的方法制作的 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ 异质结探测器,仅有1 nA的暗电流和近于0.1 pF的结电容,响应频率高,也是良好的近红外高速探测器。采用Si/Ge $_x$ Si $_{1-x}$ 及Si/SiSe做成的长波长异质结红外探测器,是近年来人们关注的材料和器件,其响应波长可做到10 μm 以上。



(4) PIN 光敏二极管。扩散型 PN 结光敏二极管, 对光电池的主要贡献是光生载流子的扩散流, 因而会受到扩散时间与扩散过程中的复合所造成的噪声的影响。而肖特基势垒光敏二极管虽然没有这两方面的影响, 但其表面金属薄层有很强烈的反射, 从而阻挡了光线进入耗尽层。而扩散型 PIN 光敏二极管, 就可兼有上述两种管子的优点。

PIN 光电二极管的结构和它在反向偏压下的电场分布, 如图 3-29 所示。在高掺杂 P 型和 N 型半导体之间生长一层本征半导体材料或低掺杂半导体材料, 称为 I 层。选择一定厚度的 I 层, 使之近似于反偏压下的耗尽层厚度, 就使 PIN 型光敏二极管具有甚至优于耗尽层型光敏二极管的高速响应特性。这种 I 层所起的作用是:

① 因为相对 P 区及 N 区来说, I 层是高阻区, 在工作情况下, 它承受着绝大部分的外加电压, 使耗尽区增大, 从而展宽光电转换的有效工作区域, 提高量子效率与灵敏度。

② 为了取得较大的 PN 结击穿电压, 必须选择高电阻率的基体材料, 这样势必增加串联电阻, 使 RC 时间常数增大, 影响管子的频率响应。而 I 层的存在, 使击穿电压不再受到基体材料的限制, 从而可选择低电阻率的基体材料, 这样不但提高了击穿电压, 即可承受较高的反向偏压, 使线性输出范围变宽, 而且减少了串联电阻和时间常数。

③ 由于 I 层的存在, 使扩散区不会到达基体, 从而减少或根本不存在少数载流子通过扩散区的扩散时间。而 I 层工作在反向, 实际上是一个强电场区, 对少数载流子起加速作用。即使 I 层较厚, 对少数载流子的渡越时间影响也不大, 这就提高了响应速度。其响应时间为 $1\sim 3\text{ ns}$, 最短达 0.1 ns 。

④ 反偏下, 耗尽层较无 I 层时要大得多, 从而使结电容下降, 一般结电容为零点几到几个 pF, 从而提高频率响应。

为完全消除扩散电流的影响, 采用类似于半导体激光器中的双异质结构, 因为可通过选择 P 区、N 区和 I 区的带隙 (E_g), 使得光吸收只发生在 I 区, 则 PIN 的性能可以大为改善。如光纤通信中, 常采用 InGaAs 材料制成 I 区和 InP 材料制成 P 区及 N 区的 PIN 光电二极管, 其结构如图 3-30 所示。InP 材料的带隙为 1.35 eV , 大于 InGaAs 的带隙, 对于波长在 $1.3\sim 1.6\text{ }\mu\text{m}$ 范围的光是透明的, 而 InGaAs 的 I 区对 $1.3\sim 1.6\text{ }\mu\text{m}$ 的光表现为较强的吸收, 几 μm 的宽度就可以获得较高响应度。在受光面, 一般镀增透膜以减弱光在端面上的反射。

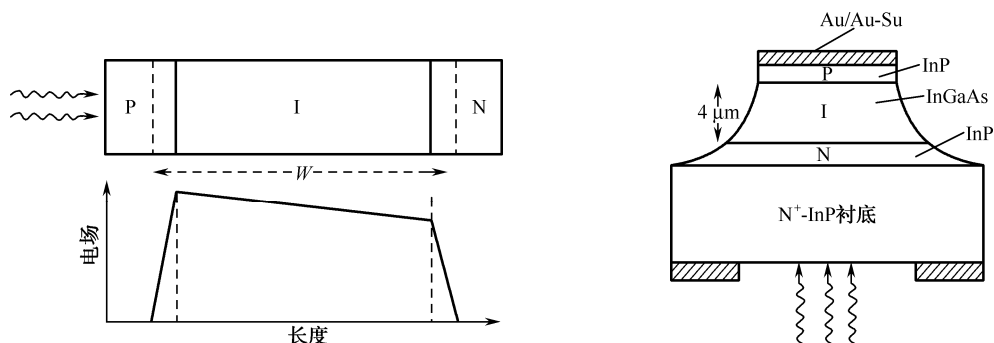


图 3-29 PIN 光电二极管的结构和它在反向偏压下的电场分布

图 3-30 InGaAs PIN 光电二极管的结构

由于在 PN 结中间夹着一层很厚的本征半导体 I 层, 在反向电压作用下耗尽区扩展到整个半导体, PN 结的内建电场就基本上全集中于 I 层中, 光生载流子在内建电场的作用下, 只产生漂移电流。因此, PIN 光敏二极管的响应时间很短, 在 10^{-9} s 左右, 频带很宽, 达 10 GHz 。

并且,由于I层很厚,可承受较高的反向电压,因而PIN光敏二极管的线性输出范围很宽。当入射光功率低于mW量级时,器件不会发生饱和。其不足的仅是,因I层电阻很大,其输出电流小,一般为零点几 μA 至数 μA 。因此,目前有将PIN光敏二极管与前置运算放大器集成在同一硅片上,并封装于一个管壳内,形成PIN混合集成的光电检测器件。

PIN混合集成光电检测器件的外形及引脚如图3-31所示,该器件是把PIN管与一个双极型晶体管宽带低噪声放大器混合集成的光电接收组件,其原理图如图3-32所示。器件输出为负极性(即输入光信号为正脉冲,输出的电压信号为负脉冲),其输出级为射极跟随器。

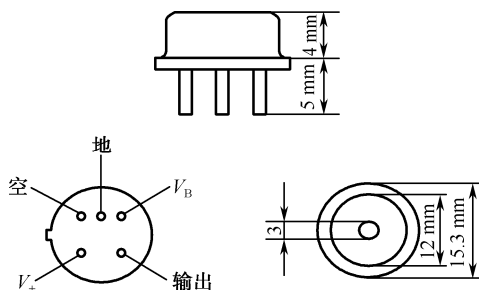


图3-31 PIN混合集成光电接收器外形及引脚图

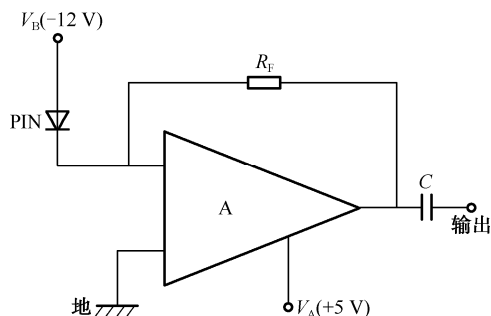


图3-32 电原理图

在使用时,在 V_A 与地, V_B 与地之间应各外接一个 $50\sim 100\mu\text{F}$ 的滤波电容器,此外还应注意,不要对引脚放电,也不要使引脚过热,要在防静电工作台上操作,否则器件很可能遭受静电损伤。此类部件由于具有响应频带宽、灵敏度和信噪比高等优点,常被用于微弱信号的光电检测和30 Mb/s的短波长的光通信系统的光电接收器。

有的集成器件使用PIN-FET微型组件,即用一个小面积和小电容的PIN光电二极管与高输入阻抗的场效应管(Field Effect Transistors, FET)前置放大器组合,其中所有引线长度及杂散电容都作得非常小。由于电容小,输入阻抗高,因此可以大大降低热噪声。这种集成器件具有供电电压低、工作稳定、使用方便等特点,因而使它在光通信、光雷达及其他要求快速光电自动控制系统中得到非常广泛的应用。

(5)雪崩光敏二极管(APD)。PIN光敏二极管工作时的反向偏置都远离击穿电压,而雪崩光敏二极管是利用在高反向电压(略低于击穿电压)下产生的雪崩效应来工作的一种与光电倍增管相对应的半导体器件。它通常工作在很高的反偏电压状态,自身有电流增益,具有响应度高、响应速度快等特点。

在设计雪崩光敏二极管(Avalanche Photodiode, APD)时,为保证载流子在整个光敏区的均匀倍增,需要选择无缺陷的材料,并保持更高的工艺卫生和保证结面的平整。此外,还可采用保护环结构来消除低击穿现象。目前,制作对 $1.06\mu\text{m}$ 掺钕激光波长特别敏感的雪崩光敏二极管(量子效率达30%)的材料主要是锗和硅。图3-33为这种二极管的结构示意图及杂质剖面图。在器件两端加反向偏压,直至PN结的耗尽层正好穿通低浓度(一般电阻率大于 $5000\Omega\text{cm}$)的 π 区。这时,结中的峰值电场如图3-34所示,正好比引起雪崩击穿的电场小一点,若再加一小电压,就可使耗尽层很快加大到 P^+ 进入器件,电子被扫到高场区,在这里发生了倍增。高场区生成的空穴横渡 π 区到达 P^+ 区,构成倍增信号。

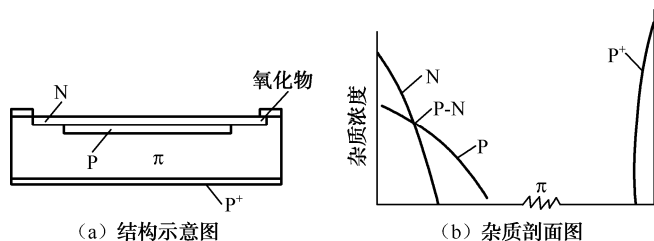


图 3-33 雪崩光敏二极管结构及杂质剖面图

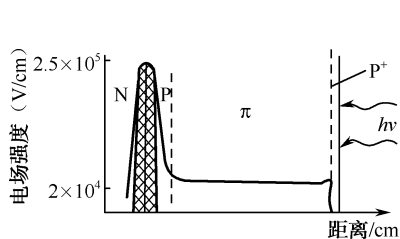


图 3-34 雪崩光敏二极管电场分布

由于 PIN 光敏二极管在较高的反向偏压下其耗尽区会扩展到整个 PN 结区，而形成自身保护（具有很强的抗击穿功能），因而不必设置保护环。所以，目前市场上的 APD，多为 PIN 雪崩光敏二极管。一般，APD 的增益可达几百倍，甚至数千倍。其电流增益或放大倍数为

$$M = I_F / I_\Phi \quad (3-47)$$

式中， I_Φ 为倍增前的输出电流； I_F 为倍增后的输出电流。

当没有光照时，PN 结不会发生雪崩倍增效应。但结区一旦有光照射时，即激发起光生载流子，它们被临界强电场所加速，从而诱发起雪崩倍增，使输出电流得到迅速增加。如果反向偏压大于击穿电压时，器件结区被击穿。击穿电压与器件的工作温度有关，温度升高时，击穿电压会增大。一般，APD 的击穿电压在几十伏到几百伏之间。

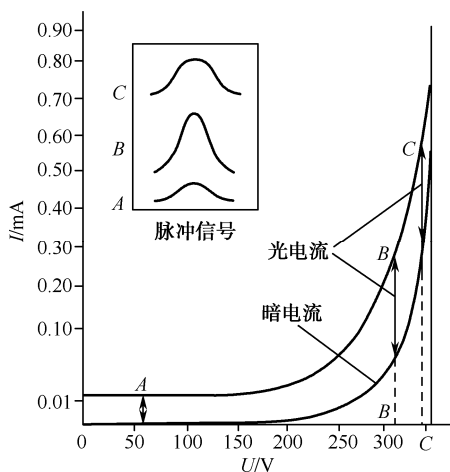


图 3-35 雪崩光电二极管暗电流和光电流与偏置电压的关系曲线

APD 的暗电流和光电流与偏置电压的关系曲线如图 3-35 所示，由图可知，当工作偏压增加时，输出亮电流（即光电流和暗电流之和）按指数形式增加。在偏压较低时，不产生雪崩过程，即无光电流倍增。因此，当光脉冲信号入射后，产生的光电流脉冲信号很小（如 A 点波形）。当反向偏压升至 B 点时，光电流便产生雪崩倍增，这是光电脉冲信号输出增大到最大（如 B 点波形）。当偏压接近雪崩击穿电压时，雪崩电流维持自身流动，使暗电流迅速增加，光激发载流子的雪崩放大倍率却减小，即光电流灵敏度随反向偏压增加反而减小，如在 C 点处光电流的脉冲信号减小。换句话说，当反向偏压超过 B 点后，由于暗电流增加得更快，使有用的光电流脉冲幅值减小，所以最佳工作点在接近雪崩击穿点附近。有时为了压低暗电流，会把工作点向左移一些，虽然灵敏度有所降低，

但是暗电流和噪声特性有所改善。由图 3-35 还可以看出，在雪崩击穿点附近电流随偏压变化的曲线较陡，当反向偏压有较小变化，光电流将有较大变化。此外，在雪崩过程中 PN 结上的反向偏压容易产生波动，将影响增益的稳定性。所以，在确定工作点后，对偏压的稳定度要求很高。

硅 APD 的光谱响应范围也在 $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 之间。为了将响应波长扩展至长波限以外，可将 APD（雪崩倍增效应发生在势垒区）和金属-半导体接触的肖特基势垒二极管结合起来，如将钼与 N 型硅构成 APD 就是一种巧妙的结合。一些能量小于硅禁带宽度的光子透过硅，被金属钼吸收，将电子激发到高能态，一部分被激发的电子，具有足够的能量进入势垒区，参与雪崩倍

增。器件的长波限取决于由接触金属与不同半导体导电类型决定的势垒高度；短波限取决于硅“窗口”的本征吸收。这种 APD 的响应波长可达 $1\sim 2\mu\text{m}$ 。如果选择适当的接触金属和硅的导电类型以及合适的工作温度，它的响应波长还可延伸至 $4\mu\text{m}$ 。

由于 APD 工作时加有很高的反向电压，使光生载流子在结区的渡越时间很短，其结电容也只有几个 pF，甚至更小。这种二极管的响应速度特别快，带宽可达 100 GHz，是目前响应速度最快的一种光敏二极管，如硅管的响应时间为 $0.5\sim 1\text{ ns}$ ，频率响应可达几十 GHz。

由于 APD 中载流子的碰撞电离是不规则的，碰撞后的运动方向也是随机的，所以它的噪声比一般光敏二极管的大。在无倍增的情况下，其噪声电流是散粒噪声；当雪崩倍增 M 倍后，其噪声电流的均方根值的近似计算式为

$$\overline{I_{\text{Nsh}}}^2 = 2qIM^n\Delta f \quad (3-48)$$

式中，指数 n 与 APD 的材料有关。对于锗管， $n=3$ ；对于硅管， $n=2.3\sim 2.5$ 。显然，由于信号电流按 M 倍增大，而噪声电流按 $M^{n/2}$ 倍增大，因而噪声电流比信号电流增大得更快。

APD 与 PMT 相比，具有体积小、工作电压低、使用方便等特点。但是，其暗电流比 PMT 的大，相应的噪声也大，故 PMT 更适于弱光探测。而在光谱为 $0.8\sim 1.1\mu\text{m}$ 区，PMT 的量子效率又低于 APD，所以在这段光谱，APD 对窄脉冲响应有更好的探测响应度。

3.3.3 光敏三极管

1. 光敏三极管结构与原理

光敏三极管和普通晶体三极管相似。其相同点：一是也有 PNP 与 NPN 两种基本结构（即都是有两个 PN 结的结构）；二是也有电流放大作用。其不同之处是：它的集电极电流主要受光的控制，不管是 PNP 还是 NPN 光敏三极管，一般用基极-集电极结作为受光结，因而有光窗；其次是只有集电极和发射极两根引出线（极少的也有基极引线）等。因此，光敏三极管是一种相当于在基极和集电极之间接有光电二极管（反向偏置）的普通三极管，它们的结构及简化原理如图 3-36 所示。

国产的 PNP 型光敏三极管为 3CU 型，它是以 P 型硅材料为衬底制作的；NPN 型光敏三极管为 3DU 型，如图 3-36 (a) 所示，它是以 N 型硅材料作衬底的。由图 3-36 (b) 可知，光敏三极管是一种相当于将基极集电极光敏二极管的电流，加以放大的普通晶体管放大器。PNP 型管在原理上与 NPN 型相同，只是所加的电压相反，集电极加上相对于发射极为负电压。

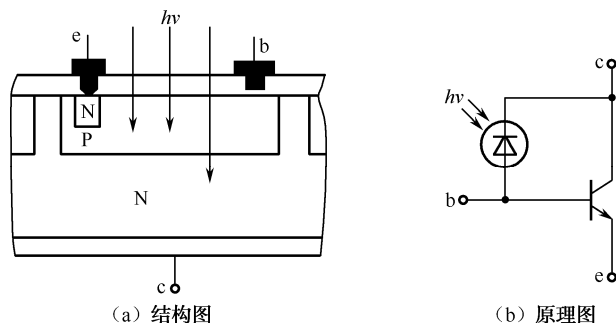


图 3-36 光敏三极管结构与原理



将光敏二极管等效电路与普通三极管等效电路相结合, 就可以得到光敏三极管的等效电路。为便于分析可得其简化的等效电路, 如图 3-37 所示。

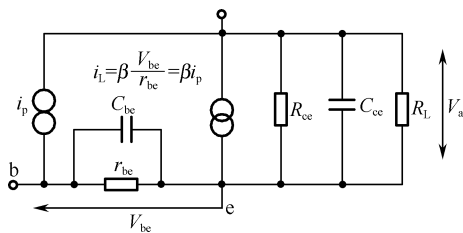


图 3-37 光敏三极管简化的交流等效电路

由图 3-37 可知, 基极与发射极电压为

$$U_{be} = \frac{r_{be}}{1 + j\omega r_{be} C_{be}} i_p \quad (3-49)$$

于是可得输出电压为

$$U_o = \frac{R}{1 + j\omega R C_{ce}} i_L = \frac{R}{1 + j\omega R C_{ce}} \beta \frac{U_{be}}{r_{be}} \quad (3-50)$$

式中, U_{be} 为施加于 b、e 结的信号电压; R 为 R_L 与 R_{ce} 的并联阻抗 [$R = R_L R_{ce} / (R_L + R_{ce})$]。

选择合适的负载, 使 $R_L \ll R_{ce}$, 此时 $R \approx R_L$, 式 (3-50) 可以简化为

$$U_o = \frac{\beta i_p R_L}{(1 + j\omega r_{be} C_{be})(1 + j\omega R_L C_{ce})} \quad (3-51)$$

考虑恒定光照, 则 U_o 为

$$U_o = \beta i_p R_L \quad (3-52)$$

与光敏二极管相比, 光敏三极管将信号放大了 β 倍。但由于 β 的非线性 (不同的 i_p 有不同的 β), 使得光敏三极管的输出信号与输入信号之间, 没有严格的线性关系。

从式 (3-49) 看出, 在交变光信号下, 由于 C_{be} 的存在造成对信号电流的分流。如果频率高, 会使 C_{be} 的阻抗等于 r_{be} , 则

$$U_{be} = i_p r_{be} / 2 \quad (3-53)$$

即有一半信号被 C_{be} 所旁路, 使有用的信号大为减小。同样, 由于 C_{ce} 的旁路作用使流过 R_L 的输出电流也大为减少。因此, 为了提高输出, 必须使时间常数 $r_{be} C_{be}$ 和 $R_L C_{ce}$ 尽可能小, 这与一般高频晶体管的考虑完全一致。但有一点需指出, 式 (3-51) 中分子与分母同时包含有 R_L , 因此一定有一个 R_L 值使响应最佳。 R_L 的增大, 可以使输出电压的幅度增加。但是, 时间常数 $R_L C_{ce}$ 也增大, 使频率响应下降, 从而使输出幅度下降。因此, 使用中必须从响应速度与输出信号幅度, 来折中选择 R_L 。

为了提高增益与频率响应, 减小体积, 常将光敏二极管、光敏三极管与晶体三极管制作在一个硅片上构成集成光电探测器件, 如图 3-38 所示, 其中以达林顿光电三极管的电流增益最高, 一般均可达到几百。

2. 光敏三极管特性

(1) 输出特性。两种不同类型光敏三极管的典型伏安曲线, 如图 3-38 所示。与光敏二极管的伏安特性不同的是, 零偏时光敏三极管无信号电流输出, 而光敏二极管仍有光电流输出。除

此以外,曲线还有两个明显的特点。一是随入射光强的增加, I_c 有饱和的趋势,即光电流与入射光照度成非线性关系。如图 3-39 (a) 所示,它表现为曲线族上密下疏,这可归结为电流放大倍数 β 是信号电流的函数。不过,并不是所有的光敏三极管均如此,有的光敏三极管在一定的照度范围内光电流与光照可以有较好的线性,即表现为曲线之间有较均匀的间距。二是在低工作电压下,光电流与所加电压成非线性关系,这也是由于 β 与工作电压有关所造成的。因此,为了尽可能减小电压对线性的影响,光敏三极管必须加上较高的工作电压。

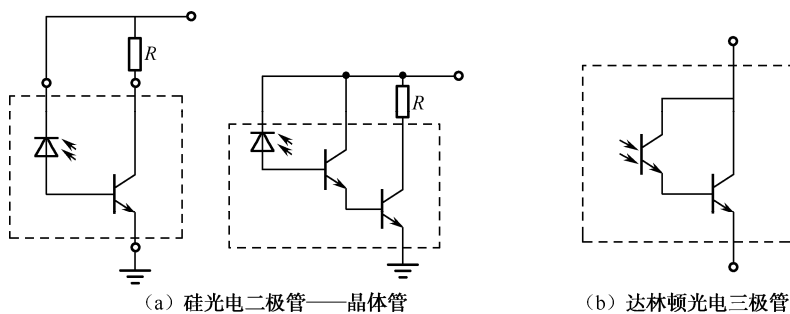


图 3-38 集成光电探测器件

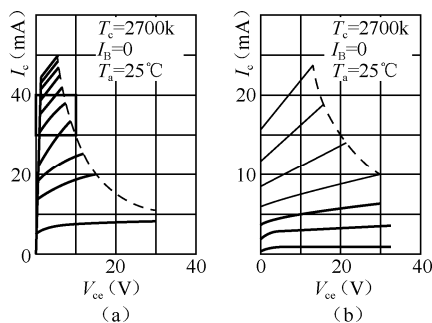


图 3-39 光敏三极管伏安特性

(2) 频率响应。率响应与结的结构、负载及时间常数 $r_{be}C_{be}$ 及 $R_L C_{ce}$ 有关。一般的光敏三极管,为了得到较大的信号电流,b、c 结做得较大。因此,电容 C_{be} 、 C_{bc} 及 C_{ce} 均较大,因而严重影响着频率响应。特别是 C_{be} ,由于结 U_{be} 处于正向,它的影响也最大。其次,在结两边产生的光生载流子的扩散过程需要一定的时间,扩散到结边界的光生载流子在结电场的作用下越过势垒也需要一定的时间。它们与器件本身的物理结构、工作状态及负载情况共同决定着光敏三极管的频率响应。

光敏三极管的频率响应也可用上升时间 t_r 及下降时间 t_f 来表示,它们与 I_c 的关系如图 3-40 所示(图中曲线是 $U_{ce}=5V$, $T=25^\circ C$ 时测得)。从图中可以看出,光强越弱(I_c 越小)上升及下降时间就越大;负载电阻越大,上升及下降时间也就越大。因此,为了取得较好的频率响应和较高的信号输出,一般需在输出负载上并联高增益、低输入阻抗的运算放大器,从而使总的阻抗减小,频率响应提高。

(3) 温度特性。由于电流放大系数 β 随温度升高而变大,因此光敏三极管的光电流随温度的上升较光敏二极管快。这样,在小信号时,由于温度增加使反向电流 I_{ceo} 急剧上升,导致探测性能的极大下降,甚至使探测器完全失效。通常,温度从 $25^\circ C$ 变化到 $100^\circ C$,光电流变为



原来的 1.6 倍之多, 而反向电流却增加三个数量级。

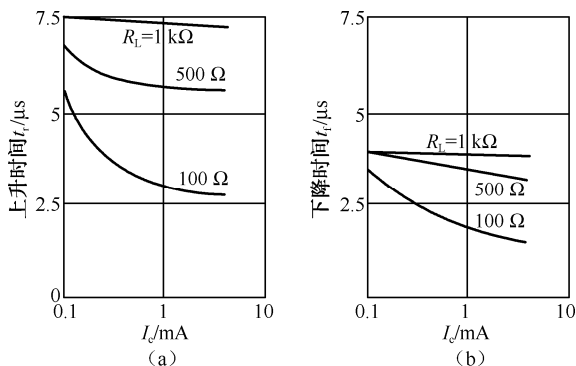


图 3-40 光敏三极管的频率特性

(4) 光敏三极管的光谱响应。同样决定于材料的禁带宽度、器件几何结构和制作工艺。硅管的峰值在 $800\sim 900\text{ nm}$ 之间。用特殊工艺制作的对蓝光灵敏的光敏管, 与蓝光电池一样, 其响应峰值可移至 600 nm 左右。

3.3.4 光伏型探测器件的使用要点及在安防中的应用

1. 光伏型探测器件的使用要点

在使用光生伏特效应探测器件时, 必须注意以下几个要点。

(1) 注意确定器件引线脚的 P、N 端。光伏器件的核心是 PN 结, 使用前必须用万用表确定器件引线脚的 P、N 端, 以免在电路中接错。

(2) 使用前要测试。光电器件在使用前要测试一下好坏, 并分清是光敏二极管还是光敏三极管, 因为它们的负载电阻有较大的差别, 一般, 光敏三极管的负载电阻为光敏二极管负载电阻的 $1/10$ 。

(3) 注意电源的连接。光伏器件都有确定的极性, 如要加电压使用时, 必须注意对 PN 结加反向电压, 即用确定的 P 端连接外电源的低电位。

(4) 注意入射光强与器件的配合。在使用光伏型器件时, 应视用途选择入射光强的范围。因光电检测器件一般光照弱些, 负载电阻小些, 加反偏压使用时, 其光电特性线性好些, 反之则差一些。因此, 在用于开关电路或逻辑电路时, 光照可以选强些; 如用于模拟量测量时, 光照就不宜过强。

(5) 注意器件的使用条件和方法。虽然灵敏度主要决定于器件, 但也与使用条件和方法有关。如光源和接收器在光谱特性上是否匹配; 入射光的方向与器件的光敏面法线是否一致等。

(6) 注意选择负载电阻。结型器件的响应速度都很快, 它主要决定于负载电阻和结电容所构成的时间常数 ($\tau=RC$)。负载电阻大, 输出电压可以大, 但 τ 会变大, 响应变慢; 相反, 负载电阻小些, 输出电压要减小, 但 τ 会变小, 响应速度变快。

(7) 注意灵敏度与带宽的折中。灵敏度与频带宽度之积为一常数的结论, 对结型光电检测器件也是适用的。

(8) 注意器件的使用温度。器件的各种参量差不多都与温度有关, 但其中受温度影响最大

的是暗电流。暗电流大的器件,容易受温度变化的影响,而使电路工作不稳定,同时噪声也大。

(9) 注意电磁与光的干扰。除了温度变化、电、磁场干扰可引起电路发生误动作外,背景光或光反馈也是引起电路误动作的重要因素,应注意设法避免与消除。

(10) 注意加红色有机玻璃滤光。光敏二极管或光敏三极管,并非只对红外光敏感,在制作时要防止环境光(日光与灯光)过强而使放大电路输出饱和而失控,因而可加红色有机玻璃滤光,以减少环境光的影响。

(11) 注意光敏二/三极管灵敏度与工作频率的使用区别。光敏三极管使用时基极通常开路,光感生电流直接馈入基极而被光敏三极管自己放大,因此光敏三极管灵敏度通常比光敏二极管大 100 多倍;光敏三极管最大工作频率只有几百 kHz,而光敏二极管则为几十 MHz。

(12) 注意光敏二/三极管线性与响应时间的使用区别。光敏二极管光电流小,输出特性线性好,响应时间快。光敏三极管光电流大,输出特性线性差,响应时间慢。一般,要求灵敏度高、工作频率低的开关电路,可选光敏三极管;要求线性好与工作频率高时,则用光敏二极管。

2. 光伏器件在入侵探测报警系统中的应用

(1) 主动式红外探测器。主动式即能主动发射红外光。当被探测目标侵入所防范的警戒线,遮挡了红外发射机与接收机之间的红外光束,而进入报警状态的电子装置就称为主动红外探测器,其基本组成与工作原理如图 2-7 所示。

其中,接收机中的接收器即对光束遮挡型的探测器,多使用光伏型探测器,但要适当选取有效的报警最短遮光时间。因为遮光时间选得太短,会引起不必要的噪声干扰,如小鸟飞过、小动物穿过都会引起报警;而遮光时间选得太长,又可能导致漏报。因此,通常以 10 m/s 的速度通过镜头的遮光时间,来定最短遮光时间。如人的最小宽度为 20 cm,则最短遮断时间为 $20\text{ cm}/(10\text{ m/s})=20\text{ ms}$ 。所以,最短遮光时间大于 20 ms,系统报警;遮光时间小于 20 ms,则不报警。

主动红外探测器多采用双光路或多光路,被广泛使用在周界报警系统工程中。

(2) 周界红外对射探测报警。采用多光路红外对射的主动红外探测器即可构成周界红外对射探测报警系统,如广州天网安防科技有限公司的新型远距离红外线幕墙(由于用多根红外射束构成高约 2 m 的防范界面,因而构成了红外线幕墙)。当物体阻断任意相邻两根射束 $\geq 20\text{ ms}$ (相当于国际级短跑运动员冲刺速度)时,即可触发输出报警信号,因此在人的奔跑、跳跃、贴地爬行、飞身等行为穿越防范界面时,都会触发报警。并且,不会由于飞鸟、昆虫等飞过而引发误报警,就是在红外线射束附近从事正常活动的人员/物体的活动也均不会触发报警,因而特别适用于院落面积狭小的特定环境使用,具有占用最小地面面积的优点。

该产品采用圆柱形外观,从外形上无法看出其具体防范部位,从而无法避让;产品表面光滑,人力无法攀爬翻越。沿警戒线安装的黑色柱体和画在地面的黄色警戒线目标明确,且采用 940 nm 波长的红外线编码调制射束而使红外线幕墙隐蔽。由于该产品采用同步通信、自适应强度调节及自适应变换频率等多项专有技术,因而误报率较低而优于国外同类产品。因此,该产品已成功应用于 2008 年北京奥运会 200 km 周界防范,故宫博物院周界防范,以及多省监狱的周界安全防范。

(3) 见光探测报警。半导体光电探测器件有光照即可转换为电信号,因而可做成见光探测报警。作者曾利用光电三极管等给公司出纳做了一个小型的见光探测报警器,将它置入一密闭的取款箱或袋中,只要有人打开存有钱或贵重物品的袋或箱时,使光电三极管见光即转换为电



信号并放大输出，从而驱动扬声器发出报警声。

3. 用光伏器件作火灾探测报警

(1) 光电式感烟探测器。光电式感烟探测器如图 3-41 所示，它根据烟粒子对光线的吸收和散射作用，可分为遮光型和散光型两种，散射光型光电感烟探测器目前已经成为主流。

遮光型的光电感烟火灾探测器的工作原理很简单，它就是利用一对组合的光电器件（即将一支红外发光器件与一支能接收红外光的光电探测器件组合在一起），当光电探测器件处于红外光照射下时，即输出一定值的电信号。当火灾前发生的烟雾不同程度地遮蔽了红外光时，便会使光电探测器件输出的电信号根本达不到原正常的电信号，从而立即发出报警信号，以便安全值班人员采取紧急预防火灾的措施。

散光型的光电感烟探测器如图 3-42 所示，它的红外发光器件与接收光的光电探测器件在其探测室内的设置通常是偏置设计，二者之间的距离一般在 20~25 mm。在正常无烟的监视状态下，光电探测器件接收不到任何光，包括红外发光器件发出的光。在烟粒子进入探测室内时，红外发光器件发出的光则被烟粒子散射或反射到光电探测器件上，当它能收到充足的光信号时，便立即发出火灾报警。这种火灾探测方法，通常被称为烟散射光法。点型光电感烟探测器通常不采用烟减光原理工作，因为无烟和火灾情况之间的典型差别仅有 0.09% 的变化。显然，这种小的变化，会使探测器极易受到外部环境的影响。



图 3-41 光电式感烟火灾探测器

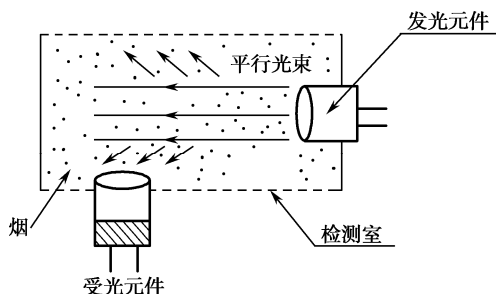


图 3-42 散射光式光电感烟火灾探测示意图

有不懂光电信息技术的人，把一种红外光束感烟探测器说成第三种感烟探测器。但实际上，它也是光电感烟探测器，而它则仅属于线型探测器，因为它是对警戒范围内某一线状窄条周围烟气参数响应的一种火灾探测器。它同点型感烟探测器的主要区别在于，线型感烟探测器将光束发射器和光电接收器分为两个独立的部分，使用时分装相对的两处，中间是用光束连接起来，其原理如前所述的遮光型光电感烟探测器。显然，这种红外光束感烟探测器又可分为对射型和反射型两种。

独立式光电感烟火灾探测报警器即不需连接系统（报警控制器）就可实现独立探测、独立报警的探测器，一般，它通过 9 V 叠层电池或者 AC 220 V 直接供电，安装使用方便，通常是安装在家庭、网吧等小型场所进行烟雾的探测。它内置避免环境光干扰的对烟雾粒子的检测室，其中含有红外发光二极管（IRLED）与接收光的光电二极管，发光器件和受光器件成锐角或钝角分布在同一平面内，受光器件平时不能接收到发光器件的光线。红外 LED 间歇工作，每隔几秒工作数百微秒，以节省电池能量。在无火灾发生时，红外 LED 即使发射脉冲光束，受光的光电二极管因接收不到发射光而不产生光电流，检测电路无输出信号。当火灾发生时，有烟

雾粒子进入检测室,因烟雾粒子对红外光产生散射,使一些散射光被光电二极管所接收,从而产生微弱的光电流。它经转换和放大电路处理后,送至MCU或专用芯片进行分析,当烟雾浓度达到设定的报警阈值时,立即发出报警声响和光指示,以提醒人们快速逃生或灭火。

(2) 感光式火灾探测器。由于物质燃烧时,在产生烟雾和放出热量的同时,也会产生可见或不可见的光辐射。因此,感光式火灾探测器又称为火焰探测器(Flame Detector),它是用于响应火灾的光特性,即扩散火焰燃烧的光照强度和火焰的闪烁频率的一种火灾探测器。火焰的光谱特性如图3-43所示,火焰的辐射是具有离散光谱的气体辐射和伴有连续光谱的固体辐射,其波长为 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ 或更宽的范围。为了避免其他信号的干扰,常利用波长小于 300nm 的紫外线,或者火焰中特有的波长在 $4.4\mu\text{m}$ 四周的 CO_2 辐射光谱作为探测信号。根据火焰的光谱特性,目前使用的感光式火灾探测器有对波长较短的光辐射敏感的紫外探测器;另一种是对波长较长的光辐射敏感的红外探测器;以及同时探测火焰中波长较短的紫外线和波长较长的红外线的紫外/红外混合探测器。

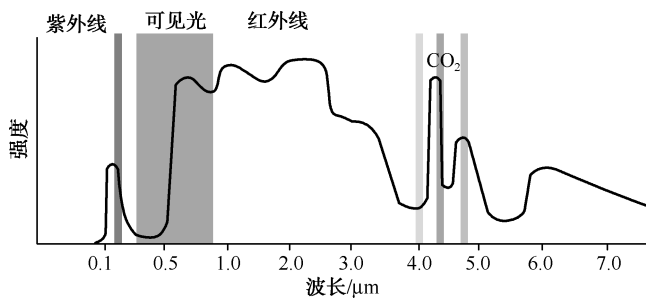


图 3-43 火焰的光谱特性

火焰燃烧过程释放出紫外线、可见光、红外线。在特定波长、特定闪烁频率($0.2\sim 20\text{Hz}$)具有典型特征,有别于其他干扰辐射,如阳光、热物体、电灯等辐射出的紫外线、红外线没有闪烁特征。火焰探测的原理就是通过检测火焰辐射出的特殊波长的紫外线、红外线及可见光等,同时配合对火焰特征闪烁频率来的识别而探测火焰的。一般选用紫外光电探测器件、热释电探测器件,以及光电二极管等探测器件。

根据探测波段,感光探测器具体可分为单紫外、单红外、双红外、三重红外、红外/紫外、附加视频等火焰探测器;根据防爆类型还可分为隔爆型、本安型等。

4. 在智能家居中用光电三极管自动拉合窗帘

这里介绍的窗帘是一个光控窗帘,天黑了,窗帘自动拉合,天亮了,窗帘自动拉开,完全省去了人工操作,定会给你的生活带来方便和情趣。

(1) 自动拉合窗帘控制电路工作原理。光控窗帘由控制电路和机械执行结构两部分组成。图3-44是控制电路电原理图,图3-45是其方框图,图3-46是图3-45各点波形图。

设初始时间为白天,光电三极管 VT_1 受光照而导通,输出“A”为低电平,使施密特触发器输出“B”为高电平。晚上天渐黑后,光敏三极管 VT_1 由导通变为截止,输出“A”由低电平变为高电平,经施密特触发器整形后,输出“B”为下降沿陡直的低电平,该下降沿经微分电路“2”形成一负脉冲“D”,触发单稳态触发器“2”翻转至暂态,其输出“F”为高电平。施密特触发器输出“B”另一路经反相器反相后,输出“C”的上升沿对单稳态触发器“1”不起



作用,其输出“C”保持低电平。此时,直流电机 M 上所加电压为下正上负,电机正转,使窗帘拉合。窗帘拉合后,由于单稳态触发器“2”暂态结束,恢复稳态,输出“F”变为低电平,电机 M 停转。早晨天渐亮后,光敏三极管 VT_1 由截止变为导通,施密特触发器输出“B”为上升沿陡直的高电平,对单稳态触发器“2”不起作用,其输出“F”保持低电平。施密特触发器输出“B”的另一路经反相器反相后,输出“C”为下降沿陡直的低电平,经微分电路“1”形成一负脉冲“E”,触发单稳态触发器“1”翻转至暂态,输出“C”为高电平。此时,电机 M 上所加电压为上正下负,电机反转,使窗帘拉开。暂态结束后,电机停转。

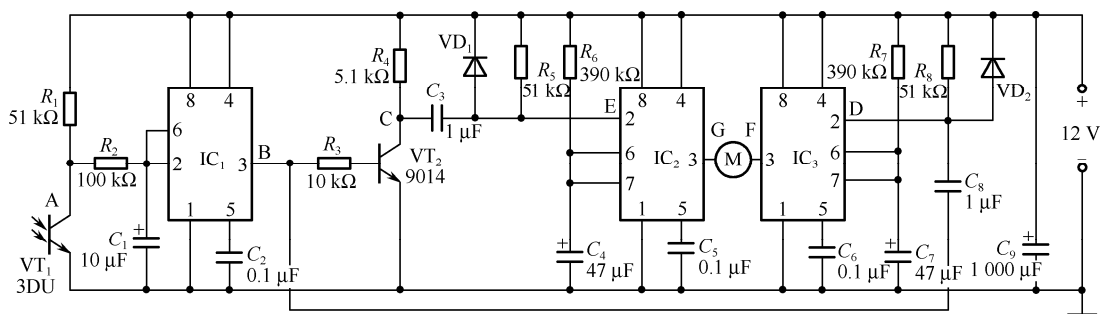


图 3-44 自动拉合窗帘控制电路原理图

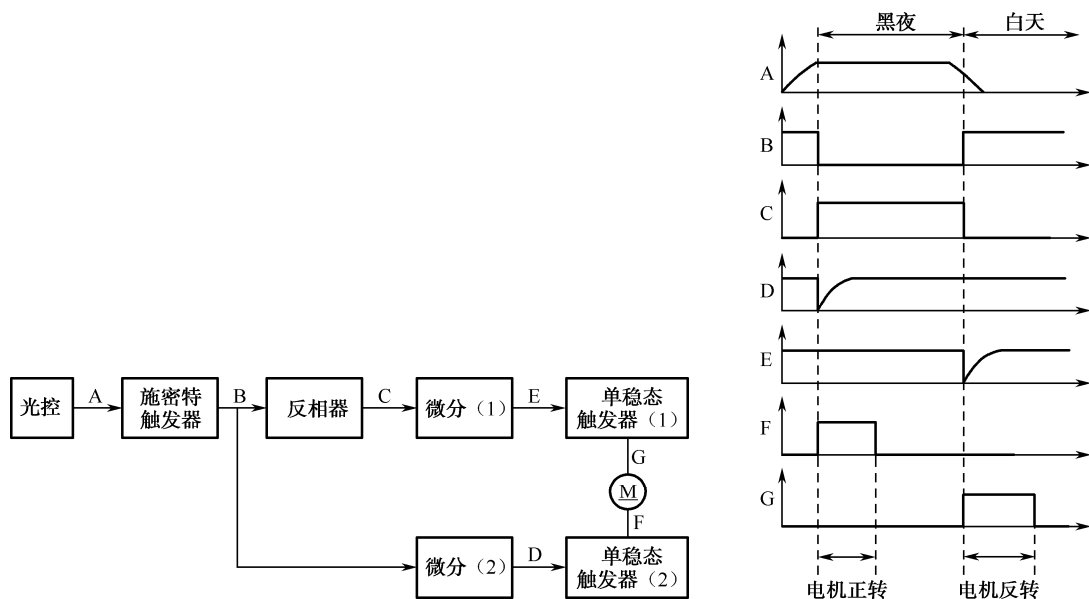


图 3-45 控制电路方框图

图 3-46 图 3-45 各点波形图

在黑夜或白天的稳定状态,光敏三极管 VT_1 输出“ A ”及施密特触发器输出“ B ”无变化,微分电路“1”、“2”均无负脉冲输出,单稳态触发器“1”、“2”输出“ G ”、“ F ”均为低电平,电机 M 静止不转。电路所需 12 V 直流电源,可由整流稳压电源或电池提供。施密特触发器和单稳态触发器均由 555 时基电路构成。555 时基电路具有电源电压范围宽 (4.5~18 V)、输出驱动能力强 (可以输出或输入 20 mA 电流) 的特点,用它构成的单稳态触发器可直接驱动直流电机,无须再设计功放驱动电路。电机 M 接在两个单稳态触发器输出端之间,可以方便地实

现正、反转控制,并具有较强的抗干扰性能。用单稳态触发器控制电机转动的另一个好处是可以免除使用行程开关,结构简单,工作可靠。

(2) 元器件选择与调试。 $IC_1 \sim IC_3$ 选用 NE555 时基集成电路。 VT_1 为 3DU 型光敏三极管。 VT_2 为 9014 等 NPN 型硅管。 VD_1 、 VD_2 可用 4001 或 2CP 系列二极管。电机 M 选用工作电压 12 V、工作电流 ≤ 150 mA 的微型直流电机。

除光敏三极管 VT_1 和直流电机 M 外,其余元器件全部焊在电路板上。图 3-47 是安装示意图,窗帘悬挂于导轨上,在导轨上方安装滑轮及牵引绳,牵引绳为一环形,套在两端的滑轮上,并保持绷紧状态。直流电机 M 通过减速传动器驱动右端滑轮转动,使牵引绳移动(见图 3-47 右端)。减速传动器可利用废旧钟表中的齿轮组制作,减速比一般为 50:1 左右。窗帘活动的一端与牵引绳某一点固定连接在一起(图 3-47 左端),以便牵引绳左右移动时可带动窗帘移动。

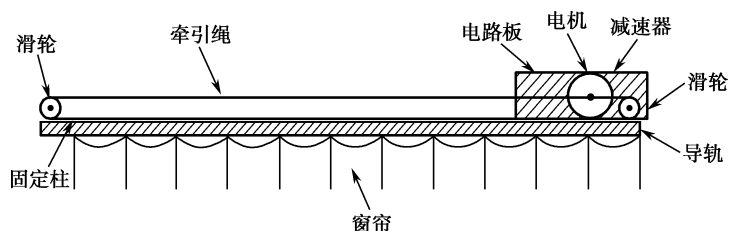


图 3-47 安装示意图

调试时,首先直接给电机 M 接上 12 V 直流电源,使其转动,看窗帘来回运行是否灵活、平稳,并测出窗帘拉合(或拉开)的运行时间。根据运行时间调整两个单稳态触发器的输出脉宽(暂态时间) T_W , $T_W = 1.1 R_6 C_4$ (或 $1.1 R_7 C_7$),适当选择 R_6 、 C_4 (或 R_7 、 C_7),使 T_W 略大于窗帘运行时间。然后用导线将光敏三极管 VT_1 、电机 M 接入电路板,接上 12 V 直流电源。当用黑纸遮住光敏管时(模拟天黑),电机应正转使窗帘拉合;当黑纸拿开时(模拟天亮),电机应反转使窗帘拉开。如电机不转,除检查接线等外,可调节 R_1 提高光控灵敏度;如窗帘运行方向反了,将电机 M 的两根引线对调即可。窗帘运行到位后电机应停止转动,如不停或窗帘尚未运行到位就停了,则应重新计算 T_W 值。最后将电路板固定在电机附近,光敏三极管固定在窗外适当位置,罩上窗帘盒,一个方便实用的光控窗帘就做好了。

5. 用光电三极管作为防盗报警犬

防盗报警犬具有自动报警、灵敏度高、安全可靠、耗电省的特点,是家庭防盗、照顾儿童的得力助手。

(1) 工作原理。防盗报警犬由光控电子开关和狗叫声语音集成电路组成,其电路原理如图 3-48 所示。

VT_1 、 VT_2 及 R_1 、 R_2 、 R_3 、 C_1 、 C_2 等构成光控开关电路, IC_1 及 VT_3 、 R_4 、 R_5 等构成狗叫声电路。 VT_1 为光敏三极管,平时在周围环境光照射下等效于低阻值电阻。 VT_2 的基极通过 R_2 接正电位而导通, IC_1 语音集成电路得不到正脉冲不工作。当 VT_1 被物体遮挡时,就产生一负脉冲电压,通过 C_1 耦合到 VT_2 的基极,导致 VT_2 截止, IC_2 集成电路获得一正触发脉冲而工作,输出音频信号通过 VT_3 放大后推动扬声器发出“汪、汪”的狗叫声。如将它置于阳台门等处,还能起到阻止儿童攀登,达到协助家长看护小孩的目的。

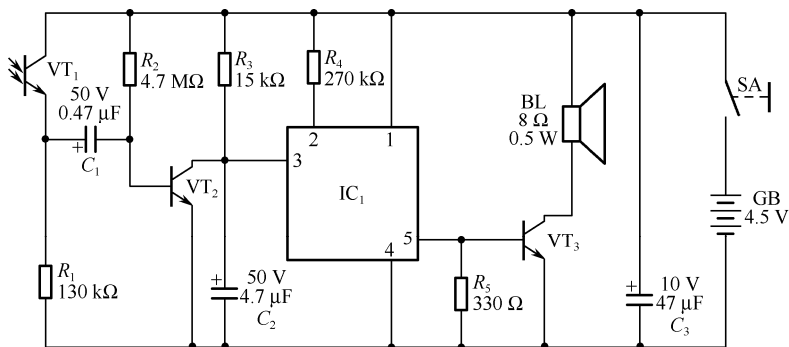


图 3-48 防盗报警犬电路原理

(2) 元器件选择与调试。IC₁ 选用 MSS0287-29 狗叫声语音集成电路；VT₁ 用 3DU5 型光敏三极管；VT₂、VT₃ 均采用 9013 型等硅 NPN 晶体管， $\beta \geq 100$ ；R₁~R₅ 为 1/8 W 碳膜电阻器；C₁~C₃ 为铝质电解电容器，耐压值见图；BL 选 YD57-1 型 8 Ω、0.5 W 电动扬声器；SA 为小型拨动开关；电源用 3 节 5 号电池；其他如图。

将元器件逐一焊接在印制板上，用两根导线引出光敏三极管，然后安装在狗模型的脖子上，电路板连同电池盒装在底部。装好电池接电源开关，再用手遮住光敏管，即可发出狗叫声。

除以上介绍的基本探测器件外，还有将半导体光电探测器件组合在一块硅片上的集成组合探测器件，还可制造出按一定方式排列的具有相同光电特性的光电探测器件阵列。这种集成组合探测器件可广泛应用于光电准直、光电测量、光电编码、光电跟踪、图像测量与识别等方面。用它们代替由分立器件组成的变换装置，不仅具有光敏点密集、结构紧凑、光电特性一致性好、调节方便等优点，而且可以完成分立元件所无法完成的探测工作。如有二、四、八象限光电探测器件，楔环光电探测器件，光电位置探测器件 (PSD)，色敏探测器件，光电开关与光电耦合器件等半导体光电探测器件组合件。欲知详情，可参阅文献[1, 2, 3]。

3.4 热电探测器件及其在安防中的应用

热电探测器件是将辐射能转换为热能，然后再把热能转换为电能的器件，它是一种无选择性探测器，最大优点是可在室温下工作。

3.4.1 热电偶与热电堆

1. 热电偶

热电偶是一种热敏元件，在光谱、光度仪器，以及器件测试定标等方面应用较普遍，在最新式的红外光谱仪上也多用这种探测器进行校准。它在接收入射辐射以后引起温度升高，随之产生一种温差电势，因而使用时不需加外电源。

目前，辐射热电偶大多采用半导体材料来组成。半导体材料具有较高的温差电位差，高的可达 500 μV/°C。半导体热电偶的结构如图 3-49 所示。

将 P 和 N 型两种半导体材料用涂黑金箔连在一起,用以增加对辐射的吸收能力。在入射辐射的作用下,由于热端温度升高,半导体材料的载流子密度也增加,平均动能也增大。这必然引起热端载流子向冷端扩散,扩散的结果, N 型材料热端带正电,冷端带负电; P 型材料则相反。在冷端产生与入射辐射有关的开路电压 U_{oc} , 它与温升 ΔT 的关系为

$$U_{oc} = M_{12} \Delta T \quad (3-54)$$

式中, M_{12} 为塞贝克 (Seebeck) 常数, 又称为温差电势率 ($V/^{\circ}C$)。

热电偶在恒定入射辐射作用下, 外接负载电阻为 R_L , 则负载电阻 R_L 上所产生的压降为

$$U_L = \frac{M_{12} R_L}{R_i + R_L} \Delta T = \frac{M_{12} R_L \alpha \Phi_0}{G(R_i + R_L)} \quad (3-55)$$

式中, Φ_0 为入射辐射的功率 (W); α 为吸收系数; R_i 为热电偶电阻; M_{12} 为温差电势率 ($V/^{\circ}C$); G 为总的热导 [$W/(m \cdot ^{\circ}C)$]。

如果入射辐射为交流辐射信号 $\Phi = \Phi_0 e^{j\omega t}$, 则产生的交流信号电压为

$$U_L = \frac{M_{12} R_L \alpha \Phi_0}{G(R_i + R_L)(1 + \omega^2 \tau_T^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (3-56)$$

式中, $\omega = 2\pi f$, f 为交流辐射调制频率; τ_T 为器件的时间常数, $\tau_T = R_Q C_Q = C_Q / G$, 其中 R_Q 、 C_Q 、 G 分别为器件的热阻、热容和热导。热导 G 与材料性质和周围环境有关, 为了使热导稳定, 常常抽成真空, 所以热电偶通常称真空热电偶。但需指出的是, 虽然真空封装的响应度为非真空封装的 2 倍以上, 但真空封装后与外界的热交换变差, 因而时间常数将会增大。

直流辐射的灵敏度为

$$S_0 = \frac{U_L}{\Phi_0} = \frac{M_{12} R_L \alpha}{G(R_i + R_L)} \quad (3-57)$$

交流辐射的灵敏度为

$$S_{AC} = \frac{U_L}{\Phi} = \frac{M_{12} R_L \alpha}{G(R_i + R_L)(1 + \omega^2 \tau_T^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (3-58)$$

由式 (3-57) 和式 (3-58) 可见, 要提高热电偶的灵敏度 (响应率), 除选用塞贝克系数 M_{12} 大的材料外, 增加对辐射的吸收率 α , 减小内阻 R_i , 减小热导 G 都是有效的。对交流灵敏度或响应率的提高来说, 降低工作频率, 减少时间常数 τ_T 也是十分明显的。但需要指出的是, 热电偶的灵敏度或响应率, 同时间常数是一对矛盾, 应用时只能兼顾。

热电偶的响应时间比较长, 为几毫秒到几十毫秒, 因而它通常只能用于探测直流状态或低频状态的辐射, 一般不超过几十赫兹。但有资料报导, 在 BeO 衬底上制作的 Bi-Ag 结结构的热电偶, 测得响应时间为 10^{-7} s, 而且可望达到 10^{-9} s。

热电偶的最小可探测功率决定于噪声, 它主要是热噪声和温度起伏噪声, 而电流噪声很小, 也无暗电流, 因为它不加偏压。一般, 半导体热电偶的最小可探测功率约为 10^{-11} W。

2. 热电堆

为了减小热电偶的响应时间, 提高灵敏度或响应率, 常把辐射接收面分为若干块, 每块接上一个热电偶, 并把这些热电偶串接起来, 这样就形成了热电堆, 如图 3-50 所示。它在镀金的

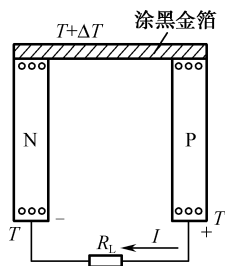


图 3-49 半导体热电偶结构图



铜基体上, 蒸镀一层绝缘层, 再在绝缘层上蒸发工作结和参考结。参考结和铜基体之间电绝缘, 但保持热接触, 工作结和铜基体之间, 既保持电绝缘又保持热绝缘。把热电材料敷在绝缘层上, 将这种结构的一些热电偶串接起来或并接起来, 即构成为热电堆。目前, 热电堆的商品指标为 $D^*=5 \times 10^8$, $\tau=10 \text{ ms}$ 。

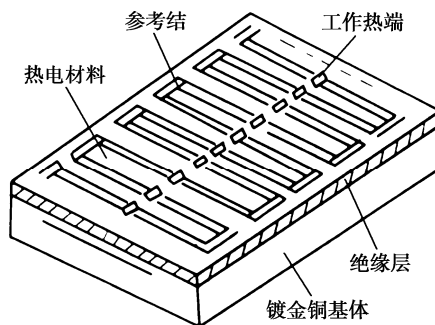


图 3-50 热电堆

一般, 热电堆的灵敏度为

$$S_t = nS \quad (3-59)$$

式中, n 为热电堆中热电偶的对数 (或 PN 结的个数); S 为热电偶的灵敏度。

热电堆的响应时间常数为

$$\tau_{th} \propto C_{th} R_{th} \quad (3-60)$$

式中, C_{th} 为热电堆的热容量, R_{th} 为热电堆的热阻抗。

由式 (3-59) 和式 (3-60) 可以看出, 要想使热电堆高速化和提高灵敏度两者并存, 就要在不改变 R_{th} 的情况下减小热容量 C_{th} 。热阻抗 R_{th} 由导热通路长度、热电堆数目及膜片的剖面面积比决定。因而, 要想使这种热电传感器实现高性能化, 就要减小热电堆的多晶硅间隔, 减小构成膜片材料厚度, 以便减小热容量。

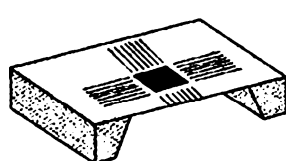
早先的红外热电堆探测器是利用掩膜真空镀膜的方法, 将热电偶材料沉积到塑料或陶瓷衬底上获得的, 但器件的尺寸较大, 且不易批量生产。随着微电子技术的发展, 发展了微机械红外热电堆探测器, 目前已有硅基的微机械红外热电堆探测器。

微机械热电堆探测器由热电堆结构、支撑膜及红外吸收层组成。为实现有效的热传导, 需要设计一定的隔热结构。微机械红外热电堆芯片的基本结构如图 3-51 所示, 它利用薄膜热导率较小的特点, 采用封闭膜与悬臂膜两种支撑膜隔热的设计。在支撑膜上生长红外吸收层, 可以大幅度、宽光谱地吸收红外辐射, 提高热结区的温度, 改善热电堆的性能。

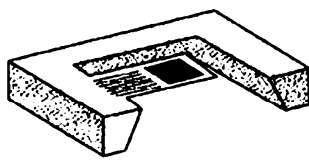
为建立热结区与冷结区的有效热传导, 需要构建一定的隔热结构, 现在主要通过薄膜来实现。应用的薄膜结构有两类, 即图 3-51 (a) 所示的封闭膜结构和图 3-51 (b) 所示的悬臂膜结构。其中封闭膜是热电堆的支撑膜为整层的复合介质膜, 一般为氮化硅与氧化硅的复合膜。悬臂膜则是指周围为气体介质所包围, 一端固定, 一端悬空的膜结构, 其中的膜也为复合介质膜。热电堆、热结区及红外吸收区都在膜上。

图 3-52 所示为一个典型的微机械热电堆红外传感器, 它包括一个基座和热电堆。基座内有一个薄膜区和一个围在薄膜区外面的厚壁区, 热电堆则由许多个串联的热电偶组成。因此, 冷结位于厚壁区上, 而热结则位于薄膜区上。由于热敏区与厚壁区是相接触的, 因而可用高精度的参考温度来确定基于热电偶输出的温度。此元件可以用来制作测量精度高、成本低、结构

紧凑的测温元件。



(a) 封闭膜结构



(b) 悬臂膜结构

图 3-51 微机械红外热电堆芯片的基本结构

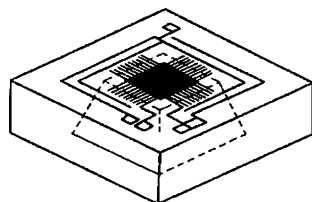


图 3-52 热电堆红外传感器

与一般的红外探测器件相比，微机械红外热电堆探测器的优点是：

- 具有较高的灵敏度。
- 有宽松的工作环境与非非常宽的频谱响应。
- 与标准 IC 工艺兼容，成本低廉且适合批量生产。

3. 热电偶与热电堆的应用及使用要点

(1) 热电偶与热电堆的应用。热电偶与热电堆是一种热敏元件，主要用于测温、测辐射，高、低温空间探测，激光测量等；尤其在光谱、光度仪器以及器件测试定标等方面的应用较普遍，在最新式的红外光谱仪上也多用这种探测器进行校准。

新发展起来的更加实用的微机械红外热电堆探测器应用更广，目前在耳式体温计、放射体温计、电烤炉、食品温度检测等领域中已作为热源发电（如工业余热、地热、太阳能发电等）的一个崭新分支。随着半导体热电材料技术的飞速发展，半导体热电发电技术以其体积小、质量轻、无运动部件、运行寿命长、可靠性高及无污染等诸多优点，在军事、医疗、科研、通信、航海、动力及工业生产等各个领域得到了广泛的应用。

显然，在很宽的波段范围内，在所有的波长上均具有相同灵敏度的各种温差的热电堆探测器，可用来进行可见光和红外辐射的测量。

值得提出的是，美国发明的热电堆远红外探测仪，可用来探测进入监视区的入侵者。它利用三个或更多个热电堆来探测进入监视区的入侵者。首先，获得一对热电堆的输出差值，然后将不同对的热电堆的输出差值进行比较，通过这种比较便可发现入侵者。

(2) 使用要点。辐射热电偶与热电堆使用时要注意以下要点：

① 同光电倍增管一样，不能受强辐射照射，它允许的最大辐射通量为几十 μW ，所以通常都用来测量 μW 以下的辐射通量。

② 测量辐射时，应对所测的辐射强度范围有所估计，不要因电流过大而烧毁热端的黑化金箔。因为流过热电偶的电流一般在 $1\mu\text{A}$ 以下，决不能超过 $100\mu\text{A}$ ，所以千万不能用万用表来检查热电偶的好坏，否则万用表中电流就会烧毁金箔，而使热电偶损坏。

③ 由半导体材料制成的温差热电堆，灵敏度很高，但机械强度较差，使用时必须十分小心，避免强烈振动。

④ 热电偶内阻为几十欧姆，信号放大时需接变压器。

⑤ 热电偶与热电堆，在保存时，输出端不能短路，要防止电磁感应。

⑥ 使用时，防止感应电流，尤其是电火花。

⑦ 使用时的环境温度，不应超过 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。



3.4.2 热敏电阻

凡吸收入射辐射后引起温升而使电阻改变, 导致负载电阻两端电压的变化, 并给出电信号的器件叫作热敏电阻或测辐射热计。

1. 热敏电阻的类型、结构及原理

热敏电阻是基于热阻效应, 即利用某些热敏材料的电阻率随温度发生变化的特性而制成的电阻性元件。按热敏材料的不同可分两类: 一是金属(如镍、铋、铂)型, 其电阻温度系数多为正的, 且绝对值比半导体的小, 但电阻与温度的关系基本上是线性的, 并且耐高温的能力较强, 因而多用于温度的模拟测量; 二是半导体(如锰、钴等的氧化物混合烧结而成)型, 其电阻温度系数多为负的, 且绝对值比金属的大十多倍, 但电阻与温度的关系是非线性的, 并且耐高温的能力较差, 因而多用于辐射的探测, 如用于温度自动补偿、防盗报警、防火系统、热辐射体的搜索和跟踪等。

热敏电阻的典型结构及其外形如图 3-53 (a) 所示, 图 3-53 (b) 为其电路符号。辐射热敏电阻装入金属壳内, 通常把二个性能相似的热敏电阻一起装入, 一个是工作元件, 接收辐射; 另一个是环境温度补偿用元件, 这两个元件有相同的导热参数, 为了保证相同的环境条件, 两个元件尽可能地靠近。否则补偿效果就差些, 补偿元件不能接受辐射, 通常用硅橡胶灌封把它掩盖起来。

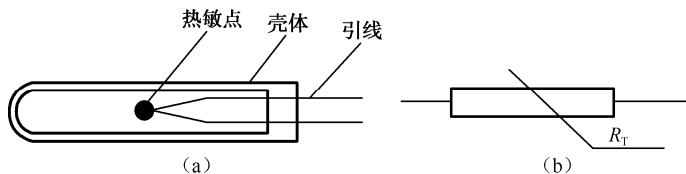


图 3-53 热敏电阻外形结构与电路符号图

热敏电阻同光敏电阻十分相似, 为了提高输出信噪比, 必须减小其长度。但为了不使接收辐射的能力下降, 有时也用浸没技术, 以提高探测度。

热敏电阻一般做成二端器件, 其典型结构如图 3-53 (a) 所示。热敏电阻也有构成三端或四端的, 二端和三端器件为直热式, 即直接由电路中获得功率。根据不同的要求, 可以把热敏电阻做成不同的形状结构, 图 3-54 所示为几种常用的热敏电阻的外形图。

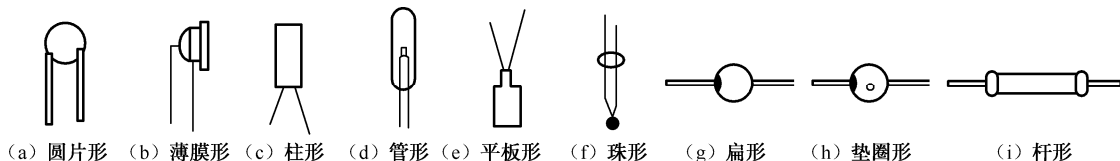


图 3-54 几种热敏电阻的外形图

2. 热敏电阻的特性参数

(1) 电阻-温度特性。热敏电阻器的实际阻值 R_T 与其自身温度有如下关系。

正温度系数的热敏电阻

$$R_T = R_0 e^{AT} \quad (3-61)$$

负温度系数的热敏电阻

$$R_T = R_\infty e^{B/T} \quad (3-62)$$

式中, R_T 为热力学温度 T 时的实际电阻值; R_0 、 R_∞ 为与电阻的几何尺寸和材料物理特性有关的常数; A 、 B 为材料常数。由式 (3-61) 和式 (3-62) 可分别求出正、负温度系数热敏电阻的温度系数 α_T 。系数 α_T 表示温度变化 1°C 时, 热敏电阻器实际值的相对变化, 即

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \frac{dR_T}{dT} \quad (1/^\circ\text{C}) \quad (3-63)$$

式中, α_T 和 R_T 为对应于温度 T (K) 时的电阻温度系数和电阻值。

正温度系数热敏电阻的温度系数为

$$\alpha_T = A \quad (3-64)$$

负温度系数热敏电阻的温度系数为

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \frac{dR_T}{dT} = -\frac{B}{T^2} \quad (3-65)$$

由式 (3-64) 与式 (3-65) 可见, 在工作温度范围内, 正温度系数热敏电阻的 α_T 在数值上等于常数 A ; 负温度系数热敏电阻的 α_T 随温度 T 的变化有很大变化, 并与材料常数 B 成正比。因此, 通常在给出电阻温度系数的同时, 必须指出测量时的温度。

材料常数 B 是用来描述热敏电阻材料的物理特性的一个参数, 又称为热灵敏指标。在工作温度范围内, B 值并不是一个严格的常数, 它随温度的升高而略有增大。一般, B 值大的电阻率也高, 对于负温度系数的热敏电阻器, B 值可按下式计算。

$$B = 2.303 \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \lg \frac{R_1}{R_2} \quad (3-66)$$

对于正温度系数的热敏电阻器, 其 A 值可按下式计算。

$$A = 2.303 \frac{1}{T_1 - T_2} \lg \frac{R_1}{R_2} \quad (3-67)$$

在式 (3-66) 与式 (3-67) 中, R_1 、 R_2 分别为温度 T_1 、 T_2 时的电阻值。

(2) 热敏电阻的阻值变化量。已知热敏电阻温度系数 α_T 后, 当热敏电阻接收入射辐射后温度变化 ΔT , 则阻值变化量 ΔR_T 为

$$\Delta R_T = R_T \alpha_T \Delta T \quad (3-68)$$

式中, R_T 为温度 T 时的电阻值。式 (3-68) 只有在 ΔT 不大的条件下才能成立。

(3) 热敏电阻的输出特性。热敏电阻的输出电路如图 3-55 所示。在图中, $R_T = R'_T$, $R_{L1} = R_{L2}$ 。若在热敏电阻上加上偏压 U_b 之后, 由于辐射的照射使热敏电阻阻值改变, 因而负载电阻 R_L 两端的电压发生变化的增量为

$$\Delta U_L = \frac{U_b}{4} \frac{\Delta R_T}{R_T} = \frac{U_b}{4} \alpha_T \Delta T \quad (3-69)$$

式 (3-69) 是在假定 $R_{L1} = R_T$ 和 $\Delta R_T \ll R_T + R_{L1}$ 条件下得到的。

(4) 冷阻和热阻。 R_T 为热敏电阻在某个温度下的电阻值, 常称为冷阻, 如果功率为 Φ 的辐射入射于热敏电阻, 若吸收系数为 α ,

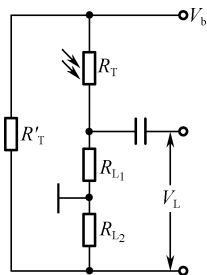


图 3-55 热敏电阻的输出电路



则热敏电阻的热阻 R_F 定义为吸收单位功率所引起的温升, 即

$$R_F = \frac{\Delta T}{\alpha \Phi} \quad (3-70)$$

因此, 式 (3-69) 可写成

$$\Delta U_L = \frac{U_b}{4} \alpha_T \alpha \Phi R_F \quad (3-71)$$

若入射辐射为交流正弦信号, $\Phi = \Phi_0 e^{j\omega t}$, 则负载上输出的电压增量为

$$\Delta U_L = \frac{U_b}{4} \frac{\alpha_T \alpha \Phi R_F}{(1 + \omega^2 \tau_F^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (3-72)$$

式中, $\tau_F = R_F C_F$ 为热敏电阻的时间常数, 而 R_F 与 C_F 分别为热敏电阻的热阻和热容。

由式 (3-72) 可见, 随着辐照频率的增加, 热敏电阻传递给负载的电压变化率 (即增量) 减小。热敏电阻的时间常数约为 $1 \sim 10 \mu s$ 。因此, 热敏电阻使用频率的上限约为 $20 \sim 200 \text{ kHz}$ 。

(5) 电压灵敏度 (或响应率)。直流灵敏度的表达式为

$$S_0 = \frac{U_b}{4} \alpha_T \alpha R_F \quad (3-73)$$

交流灵敏度的表达式为

$$S_{AC} = \frac{U_b}{4} \frac{\alpha_T \alpha R_F}{(1 + \omega^2 \tau_F^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (3-74)$$

由式 (3-73) 与式 (3-74) 可见, 要增加热敏电阻的响应率或灵敏度, 需采取的措施有

- ① 增加偏压 U_b , 但会受热敏电阻的噪声以及不损坏元件的限制。
- ② 把热敏电阻的灵敏接收面涂黑, 以增加吸收率 α 。
- ③ 增加热阻 R_F , 其办法是减少元件的接收面积及元件与外界对流所造成的热量损失。常将元件装入真空壳内, 但随着热阻 R_F 的增大, 响应时间 τ_F 也增大。为了减小响应时间, 通常把热敏电阻贴在具有高热导的衬底上。

④ 选用 α_T 大的材料, 即选取 B 值大的材料。当然, 还可使元件冷却工作, 以提高 α_T 值。

(6) 最小可探测功率。最小可探测功率受其噪声的影响。若工作频率 $f > 10 \text{ Hz}$ 时, 电流噪声可忽略不计; 但环境温度起伏造成器件温度起伏变化所产生的噪声为 $\Delta \bar{T}_N^2 \approx 4kT^2 \Delta f R_Q$, 如果将元件装入真空壳内, 即可降低这种噪声。根据噪声情况, 热敏电阻可探测的最小功率为 $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ W}$ 。

3. 热敏电阻的特点及参数选择

(1) 热敏电阻的特点。

- 电阻的温度系数大, 灵敏度高, 热敏电阻的温度系数一般为金属电阻的 $10 \sim 100$ 倍;
- 结构简单, 体积小, 可以测量近似几何点的温度;
- 电阻率高, 热惯性小, 适宜做动态测量;
- 像电阻一样, 使用方便;
- 常用的半导体热敏电阻的阻值与温度的变化成非线性;
- 稳定性和互换性较差。

(2) 热敏电阻的参数选择。由特性参数分析可知, 要使热敏电阻的电压灵敏度大, 则电流

I 、电阻温度系数 β 、热敏电阻 R_T 、吸收系数 α 都要大,而热导 G 、热辐射的交变频率 ω 和热容 C_F 都要小。但是,这些参量常常彼此相互制约,只能在实际应用中折中地选取,而不能随意增减。选取这些参数值的大小通常考虑如下几点。

① 由于要求放大器的输入阻抗要远大于 R_T ,这就限制了 R_T 不能任意的大。另外,假如 R_T 很大,那它和引线的杂散分布电容等参数和放大器输入电容等所构成的电路时间常数就有可能大于热时间常数,这将使器件的频率特性变坏,甚至难以工作。

② 热敏电阻的温度系数 α_T 取决于材料。对于大多数金属, $\alpha_T \approx 1/T$ 。对于大多数半导体,在某有限温度区间内, $\alpha_T \approx 3000/T^2$,所以,通过制冷可提高 α_T 。

③ 为了提高吸收系数 α ,常常要使热探测器灵敏面表面黑化,以保证在可见光区的充分吸收。

④ 为了减小热导 G ,可使接收元件装在一个真空的外壳里。但 G 小会使热时间常数 τ ($=C_F/G$)变大,使得器件的频率特性变坏。有时为了提高频率特性,需要把热敏电阻粘在一块热导率很大的衬底上,以取得小的时间常数。

⑤ 电流 I 不能很大,因 I 若较大,产生的焦耳热会使元件的温度提高,如果 α_T 是负值,还可能因为 R_T 变小而产生破坏性的热击穿。另外,电流 I 大了,噪声也要随之增大。限制热敏电阻最小可探测功率的主要因素,是与元件电阻有关的热噪声和与辐射吸收、发射有关的温度噪声。在室温情况下,热敏电阻的噪声等效功率可达 $10^{-6} \sim 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,在制冷到液氮温度(3 K)时,可达到 $10^{-13} \sim 10^{-14} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

4. 几种新型热敏电阻

(1) 超导热敏电阻。所谓超导热敏电阻,是利用某些金属或半导体,从正常态变为超导态时,其电阻值发生巨大变化这一特性来工作的。超导材料多为铌、钽、铅或锡的氮化物,它们在15~20 K时,即变为超导体。超导转变发生在十分之几度或百分之几度的温度范围,其转变期内的温度仅为几分之一开氏温度,因而其电阻-温度曲线非常陡峭。例如,氮化铌,可供利用的转变温度范围为1~15 K。超导热敏电阻用一个超导体材料制成薄片、细丝或薄膜,装在置于杜瓦瓶内的散热片上,当受到辐射时,加热使温度增加,从而引起电阻改变,并通过桥式电路检测出来。但要保持住转变期温度,所需的制冷量很大,控制复杂,因此这种探测器目前还难以在实验室外使用。由于超导热敏电阻在转变点工作的稳定性非常重要,因而工作温度必须精确控制,并且低温工作也有噪声低、热容量小的优越性。与光电探测器件在某些光谱区对比,超导热敏电阻将在 $50 \mu\text{m} \sim 1 \text{ mm}$ 的光谱范围内有很大用途。

(2) 碳热敏电阻。碳热敏电阻的灵敏元件是从碳质电阻上切下来的一小块,一般是厚 $48 \mu\text{m}$,面积为 19 mm^2 的薄片,装在一个双层杜瓦瓶内。即使液态空气瓶包着液态氢气瓶,在氢中用真空泵抽空,将温度降到氢的正常沸点。在杜瓦瓶的底部,有三个透红外的窗口,它们依次为最外层的室温下的石英片、液态空气中的石蜡和在液氢中的石英。用它们作为滤光片,以滤去小于 $40 \mu\text{m}$ 的波长。碳热敏电阻的响应率很高,约为 10^4 V/W ,响应时间为10 ms,比探测率 D^* 为 $4.25 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。当它制冷到2.1 K时,其比探测率 D^* 要比一般热敏电阻高一个数量级。目前,它已用于极远的红外波段的分光考察。

(3) 锗热敏电阻。所谓锗热敏电阻,其测辐射的灵敏元件主要是用的锗。实际上,锗热敏电阻的灵敏元件是锗掺镓单晶。当它制冷到2.1 K时,比探测率 D^* 比一般热敏电阻高1~2个数量级,并且它的光谱响应宽,可延伸到 $1000 \mu\text{m}$ 以外。



(4) 微机电系统 (MEMS) 热敏电阻。为了尽可能增加器件的热绝缘性, 减小热导以提高器件的灵敏度, 采用 MEMS 技术, 制成了一种悬浮微桥结构的微热敏电阻。它用两臂支撑的微桥实现热绝缘, Si、N 作为支撑薄膜, 微桥下方的硅衬底被掏空, 微桥桥面上制作多晶锗硅 $\text{Poly-Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$, 薄膜电阻作热敏探测源。为提高对红外的吸收, 表面有 SiO/SiN 复合膜作为红外吸收层。

此外, 一种完全与 IC 技术兼容的 MEMS 工艺制成的新型微热敏电阻, 是通过硅的各向异性腐蚀, 把 CMOS 结构的 n 阱掏空而形成的悬吊结构 (利用 TMAH 溶液的电化学技术)。当像素单元为 $74\mu\text{m}\times 74\mu\text{m}$ 时, 这种新型微热敏电阻的直流响应率达到 $9\,250\text{ V/W}$, 比探测率可达 $2\times 10^9\text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。由于这种方法在完成 CMOS 结构后, 不再需要任何光刻或红外敏感材料的沉积, 使得探测器的成本大大降低, 几乎可以做到与 CMOS 芯片的成本等价, 因而具有非常大的发展前途。目前, 微热敏电阻阵列大小已达 640×480 , 像素尺寸 $25\mu\text{m}\times 25\mu\text{m}$, 性能已达到制冷型光子探测器的水平。

5. 热敏电阻的应用及使用要点

(1) 热敏电阻的应用。由上可知, 热敏电阻是通过探测入射辐射, 使其电阻值变化, 从而检测输出电压信号的变化, 据此可测量到温度。并且, 它测温的响应率较高, 因此广泛用于测量温度、恒温控制与红外探测等。

在实际应用中, 热敏电阻通常接成桥式电路或以补偿元件为负载再接放大器, 如图 3-56 所示, 图中, R_{T1} 为接收元件, R_{T2} 为补偿元件, $R_1=R_2$ 为普通电阻, R_3 为普通电阻或放大器电路; U_{bb} 为加在热敏电阻两端的偏置电压。在图 3-56 (a) 中, 当没有光辐射时, $R_{T1}=R_{T2}$, 使电桥保持平衡; 有光辐射时, 接收元件 R_{T1} 的电阻值改变, 而补偿元件 R_{T2} 的电阻值不变, 因而电桥不平衡, O_1 点的电位发生变化, 检测该点的电位, 即可探知光辐射的情况。在图 3-56 (b) 中, 当有光辐射时, 接收元件 R_{T1} 的电阻值改变, 而补偿元件 R_{T2} 的电阻值不变, 因而负载 R_3 两端的电压发生变化。检测该电压信号, 即可探知光辐射的情况。

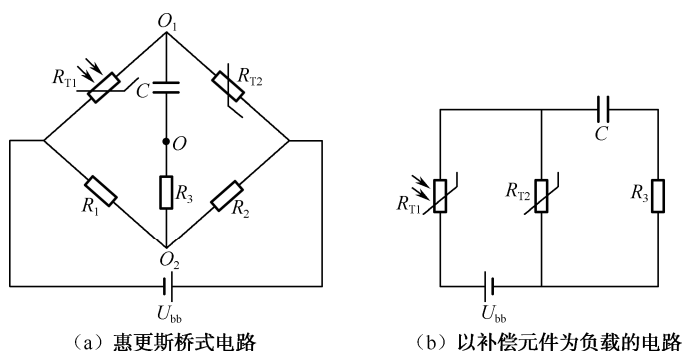


图 3-56 热敏电阻的典型应用电路

目前, 主要发展硅基微测辐射热计焦平面阵列器件, 如 240×360 像素双层微测辐射热计阵列, 其比探测率 D^* 已提高到 $10^9\text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 并用于凝视型红外成像系统。

(2) 热敏电阻的使用要点。

- 热敏电阻的响应灵敏度很高, 一般不需要制冷, 如对灵敏面采取制冷措施后, 灵敏度会进一步提高。

- 热敏电阻的机械强度也较差, 容易破碎, 使用时要小心。
- 与热敏电阻接近的放大器要有很高的输入阻抗。
- 流过热敏电阻的偏置电流不能大, 以免电流产生的焦耳热影响灵敏面的温度等。

3.4.3 热释电探测器件

与其他类型热探测器件相比, 热释电探测器件具有很多优点。

(1) 在速度方面, 其工作频率可达几百千赫以上, 接近兆赫兹, 远远超过其他所有热电探测器件。一般的热电探测器件的时间常数典型值在 $1\sim 0.01\text{ s}$, 而热释电探测器件的有效时间常数可低至 $10^{-4}\sim 3\times 10^{-5}\text{ s}$ 。

(2) 热释电探测器件的探测率高, 仅实验室的气动探测器的低频 D^* 比热释电探测器件稍高 (约 1.5 倍), 但这一差距正在逐步缩小。

(3) 热释电探测器件工作不需外加偏置电压, 且有均匀的大面积的灵敏面。

(4) 与热敏电阻相比, 它受环境温度变化的影响较小。

(5) 热释电探测器件的强度和可靠性比其他热电探测器件好, 且制作较容易。

由于热释电探测器件具有上述特点, 使它受到特别的重视, 因而发展异常迅速, 并获得广泛应用。

1. 热释电探测器件的结构与原理

根据性能的不同要求, 通常将热释电探测器件的电极结构做成如图 3-57 所示的面电极和边电极两种结构。在图 3-57 (a) 所示的面电极结构中, 电极置于热释电晶体材料的前、后表面上, 其中一个电极位于辐射灵敏面内。这种电极结构的电极面积较大, 电极间距离较短, 因而极间电容较大, 故不适宜于高速应用。此外, 由于辐射要通过电极层才能到达晶体, 所以电极对于待测的辐射波段必须透明。

在图 3-57 (b) 所示的边电极结构中, 电极所在的平面与辐射灵敏面互相垂直, 电极间距离较大, 因而电极面积较小, 故其极间电容较小, 适宜于高速应用。所以, 在高速运用时宜采用边电极结构的器件。

热释电探测器件的工作原理, 如图 3-58 所示。用调制频率为 f 的红外辐射照射热释电晶体, 就会使得晶体的温度、晶体的自发极化以及由此而引起的面束缚电荷均随频率 f 而发生变化。如果频率较低, 即 $f < 1/\tau$ (τ 为自由电荷起中和作用的平均时间), 热释电晶体的面束缚电荷将始终被体内自由电荷所中和, 因此显不出变化来。但若 $f > 1/\tau$, 体内自由电荷就来不及中和面束缚电荷的变化, 结果就使晶体在垂直于 P_s 的两端面间出现开路交流电压。如果通过两端面的电极, 连接上负载 R_L , 就会有电流流过负载, 从而在负载上有电压输出。总之, 当有 $f > 1/\tau$ 的调制辐射照射到晶体时, 负载 R_L 的两端就会产生交流信号电压, 这就是热释电探测器件的工作原理。

若温度对时间的变化率为 dT/dt , P_s 对时间的变化率为 dP_s/dt 。它相当于外电路上流动的电流。设电极面积为 A , 则信号电压的大小为

$$\Delta U = AR_L \frac{dP_s}{dt} = AR_L \frac{dP_s}{dT} \frac{dT}{dt} \quad (3-75)$$

式中, A 为电极面积; dP_s/dT 实际上就是热释电系数 P , 当 ΔT 比较小时, dP_s/dT 可以看成常

数。因此式 (3-75) 可表示为

$$\Delta U = AR_L P \frac{dT}{dt} \tag{3-76}$$

式 (3-76) 说明, 输出信号 ΔU 正比于温度的变化率, 而不取决于晶体与入射辐射是否达到热平衡。显然, 如果温度不变化 (即入射辐射不变化), 则无电信号输出。

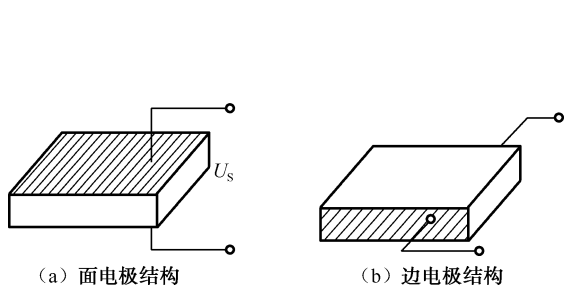


图 3-57 热释电的电极结构

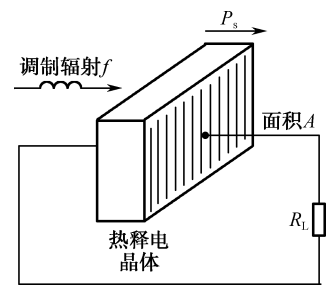


图 3-58 热释电探测器工作原理

2. 热释电探测器件的类型

由上述可知, 对热释电晶体, 要求因温度变化而产生的电压变化 ΔU 大, 即希望有大的热释电系数 P 。要热释电系数大, 就要求 P_s 随温度变化大。图 3-59 为硫酸三甘钛 (TGS) 和钛酸钡 (BaTiO_3) 的 P_s - T 关系曲线, 对于 TGS 的情况, P_s 是连续变化的, 到居里点处为零, 这是属于二级相变的情况。 BaTiO_3 的 P_s 则是在居里温度处突然下降到零, 这是属于一级相变的情况。曲线的斜率的绝对值就是热释电系数 P 。由图 3-59 可以看出, 当工作温度比居里温度低很多时, P 值虽大, 但起伏太大, 且晶体容易退极化。当温度离居里温度不太远时, P 较大, 同时比较恒定, 即温度波动变化小。所以选择热释电晶体要找室温时 P 值足够大, 同时居里点要比室温显著地高的材料。另外, 若工作温度靠近居里点, 则最好选用二级相变的材料, 因为这时一级相变材料噪声大。

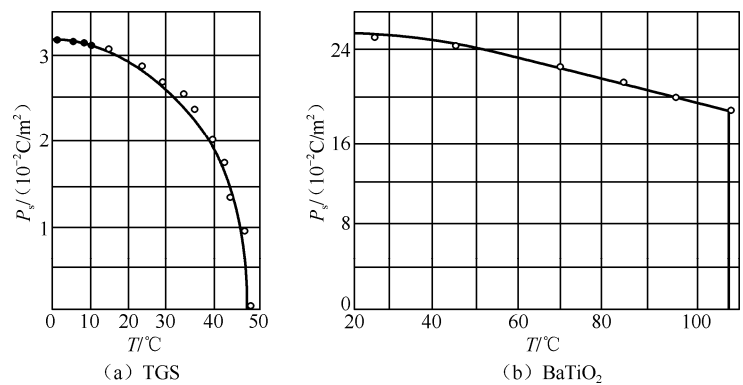


图 3-59 自发极化随温度变化的两种典型

现在已知的铁电材料达 1 000 种以上, 对其中 10% 的热释电性能进行了研究。但现在真正符合实用的材料不过 10 余种, 其中最主要的有下列几种材料做成的热释电器件。

(1) 单晶类热释电器件。

① 硫酸三甘酐 $[(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3\text{H}_2\text{SO}_4]$ ，简称 TGS。最早制成，工艺成熟，但居里温度低 ($49\text{ }^\circ\text{C}$)，耐受激光的能力差，器件怕潮易碎，有退极化现象。因此，目前多不用纯 TGS，而使用经掺杂、辐射等处理的改进材料。例如，对 TGS 进行重氢化处理，得到 DTGS，居里温度达到 $56\text{ }^\circ\text{C}$ ；如果对 DTGS 用硒 (Se) 或有机杂质氨基丙酸掺杂处理，居里温度可到 $62.3\text{ }^\circ\text{C}$ ，并达到锁定极化的作用。此外，掺杂丙乙酸的 TGS (LATGS) 具有很好的锁定极化特点，温度由居里温度以上降到室温时，仍无退极化现象，其热释电系数也有所提高。掺杂后 TGS 晶体的介电损耗减小，降低了噪声，介电常数下降改进了高频特性。在低频时，这种器件的 $\text{NEP}=4\times 10^{-11}\text{ W/Hz}^{-1/2}$ ， $D^*=5\times 10^9\text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ ，它不仅灵敏度高，且响应速度也很快。

② 铌酸锶钡 ($\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$)，简称 SBN。当钡含量 x 从 0.25 增加到 0.52 时，可使居里温度从 $47\text{ }^\circ\text{C}$ 增加到 $115\text{ }^\circ\text{C}$ 。这种材料有适于制作红外探测器的许多优点：它在大气条件下性能稳定，无须窗口材料保护，电导率 σ 很低 (即电阻率高)，热释电系数 P 大，机械强度高，容易制成薄片。并且，对 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上的红外波段吸收率很高，不必涂黑。由于在高达 50 MHz 的频率下也没有发现明显的压电谐振，可方便用于快速探测，现有商品的时间常数低于 3 ns ，更宜于低频、小面积工作。SBN 的退极化很慢，配合场效应管前置放大器使用时，可以用晶体管的电源给探测器加偏置，以保持经常极化。缺点是晶体生长较困难，小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的波段吸收率较小，必须涂黑；用在高频大面积情况不利。如果掺入 1% 的 La_2O_3 ，可提高其热释电系数 P 。掺杂 SBN 的热释电器件无退极化现象，其比探测率 D^* (500 K , 10 Hz , 1 Hz) 达到 $8\times 10^8\text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。掺镧后，虽然居里温度有所降低，但极化仍很稳定，损耗也得到改善。

③ 钽酸锂 (LiTaO_3)，简称 LT。在室温下，热释电响应约为 TGS 的一半，但在低于零度或高于 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 时都比 TGS 好。器件的居里温度高 ($T_c=620\text{ }^\circ\text{C}$)，在室温下其响应率几乎不随温度变化；可以工作在很高的环境温度下，能承受高能量入射辐射，且不退极化；机械强度高，物理化学性能稳定，不需保护窗口；响应速度快，其时间常数极限为 $1\times 10^{-12}\text{ s}$ ，仅受晶格振动频率限制，适于探测高速光脉冲，现已用于测量峰值功率为几个千瓦，上升时间为 100 ps 的 Nd: YAG 激光脉冲。比探测率 D^* (500 K , 30 Hz , 1 Hz) 可达 $8.5\times 10^8\text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。也已经用于 CO_2 激光脉冲的探测，是一种极有前途的探测激光脉冲的热释电探测器件。

④ 铌酸锂 (LiNbO_3)。有相当高的居里温度 ($T_c=1200\text{ }^\circ\text{C}$)；其介电常数也很小， $\epsilon=30\sim 40$ ；电阻率相当高， $\rho=9.8\times 10^{10}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 。只是热释电系数略小， $P=0.4\sim 0.7$ 。对某些特殊应用，如环境温度很高的情况，它将是一种有前途的器件。例如，日本已经把 LiNbO_3 热释电探测器件用在卫星红外地平仪上，属低频使用，其比探测率 D^* 达 $10^8\text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。实际上，这种材料最宜于用在高频、大能量输入的情况。

(2) 陶瓷类热释电器件。特点是热释电系数 P 与介电常数 ϵ 均较大，因而两者的比值并不高，并且机械强度大，物理化学性能稳定，电阻率可用掺杂来控制；其承受的辐射功率可超过 LiTaO_3 热释电探测器件，居里温度高，不易退极化；容易制造，成本低。

① 钛酸铅 (PT)。其居里温度为 $470\text{ }^\circ\text{C}$ ；介电常数 ϵ 为 200；热释电系数接近于 6×10^{-6} 。从全部性能看，它优于 SBN，较适宜于低频使用。重要的是它在室温下离居里温度很远，不会产生退极化现象，只要极化一次就行了，而且它是热压陶瓷，加工方便，宜于批量生产。现在 D^* (500 K , 20 Hz , 1 Hz) $=1.7\times 10^9\text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ ，从 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 到 $+60\text{ }^\circ\text{C}$ 性能不变。日本已用于科学卫星上，现在用这种材料已制成商品工业红外辐射计。

② 锆钛酸铅 (PZT)。其居里温度为 $365\text{ }^\circ\text{C}$ ，用于激光探测时不易因功率过大而退极化，



具有快响应、高探测率的特点。 $D^*(500\text{ K}, 1\text{ kHz}, 1\text{ Hz}) = 7 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$, 使用 $50\ \Omega$ 分流电阻可得到纳秒响应时间, 且容易制造, 成本低等, 能取得大面积的均匀灵敏面。

(3) 薄膜类聚合物热释电器件。这类有机聚合物的特点是, 热释电材料的导热小, 介电常数也小; 易于加工成任意形状的薄膜, 富有弹性; 物理化学性能稳定; 易于制造, 价格低廉。尽管它的热释电系数 P 不大, 但介电常数 ϵ 也小, 所以比值 P/ϵ 并不小。

在这种聚合物热释电材料中, 性能比较好的有下列几种, 如聚二氟乙烯 (PVF2)、聚氟乙烯 (PVF)、聚氟乙烯和聚四氟乙烯的共聚物等。目前, 利用薄膜类有机聚合物热释电材料 PVF2, 已得到比探测率 $D^*(500\text{ K}, 10\text{ Hz}, 1\text{ Hz})$ 已达 $10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

(4) 快速热释电探测器件。由于热释电探测器件的输出阻抗高, 需配以高阻抗负载, 其时间常数较大, 因而不适于探测快速变化的光辐射。当用于测量很窄的激光峰值功率和观测波形时, 要求其响应时间要小于光脉冲的持续时间。为此, 近年来发展了快速热释电探测器件。这种器件一般都设计成同轴结构, 即将热敏元件置于阻抗为 $50\ \Omega$ 的同轴线的一端, 采用面电极结构时, 时间常数可达到 1 ns 左右, 采用边电极结构时, 时间常数可降至几个皮秒。如利用热敏元件 SBN 晶体薄片, 采用边电极结构, 电极 Au 厚 $0.1\ \mu\text{m}$, 衬底选用导电良好的 Al_2O_3 或 BEO 陶瓷材料, 输出用 SMA/BNC 高频接头, 响应时间为 13 ps 。其最低极限值受晶格振动弛豫时间限制, 约为 1 ps 。不采用同轴结构而采用一般的引脚引线封装结构, 频响带宽已展宽到数十兆赫。快速热释电器件一般用于探测大功率脉冲激光, 因而应能承受大的辐射功率而不被损伤。所以, 它是选用损伤阈值高的热释电材料和高热导衬底材料来制成的热释电器件。

3. 热释电器件的特性参数

(1) 电压灵敏度。按照光电器件灵敏度的定义, 热释电器件的电压灵敏度 S_V 为热释电器件输出的电压的幅值 $|U|$ 与入射光功率 P_i 之比, 即

$$S_V = \frac{|U|}{P_i} = \frac{\alpha \omega P A R}{G(1 + \omega^2 \tau_T^2)^{\frac{1}{2}} (1 + \omega^2 \tau_e^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (3-77)$$

式中, $\tau_T = R_Q C_Q = \frac{C_Q}{G}$ 为热释电器件的热时间常数; $\tau_e = RC$ 为热释电器件的电路时间常数,

其中 $R = R_d // R_g$, $C = C_d + C_g$, R_d 与 C_d 为热释电器件的等效电阻和电容, R_g 与 C_g 为外接放大器的等效输入电阻和电容; α 、 ω 、 P 、 A 即为前面所述的吸收系数、入射的调制频率、热释电系数、热敏面积。

由式 (3-77) 可以得出以下几点结论。

- ① 当入射辐射为恒定辐射 (即 $\omega=0$) 时, $S_V=0$ 时, 说明热释电器件对恒定辐射不灵敏。
- ② 在低频段, $\omega \ll 1/\tau_e$ 时, 灵敏度 S_V 与 ω 成正比, 这正是热释电器件交流灵敏的体现。
- ③ 但 $\tau_e \neq \tau_T$ 时, 通常 $\tau_e < \tau_T$ 在 $\omega = 1/\tau_T \sim 1/\tau_e$ 范围内, S_V 为一个与 ω 无关的常数。这只是在假定 P 、 G 、 C 、 C_Q 和 R 等物理量均与频率无关的条件下才成立。从式 (3-77) 知, S_V 与 R 成正比。一般, $R_d \gg R_g$, 此时, S_V 随 R_g 的减小而降低, 因而在对带宽无特别要求的情况下, R_g 应尽量取得大些 (如 $10^{10} \sim 10^{11}\ \Omega$), 以便得到高的灵敏度。另一方面, 随着 R 的减小, 响应的平坦区域却愈来愈宽, 这说明, 可通过改变放大器的输入电阻 R_g 来展宽工作频带。

④ 在高频段 ($\omega \gg 1/\tau_T$ 或 $1/\tau_e$) 时, S_V 则随 ω^{-1} 变化。所以在许多应用中, 式 (3-77) 可近似为

$$S_V \approx \frac{\alpha P A}{\omega C_Q C} \quad (3-78)$$

该式表明,减小热释电器件的有效电容和热容有利于提高高频段的灵敏度。

(2) 不同负载下的 S - f 特性。根据上述分析,我们可得出不同负载下的 R - f 特性。图 3-60 给出了不同负载电阻 R_L 下灵敏度与频率的关系曲线。

由图 3-60 可见,增大 R_L 可以提高灵敏度,但是频率响应的带宽变得很窄。如大的负载电阻 R_{L1} 比小的负载电阻 R_{L3} 的灵敏度高很多,但带宽却比负载电阻 R_{L3} 的窄很多,因此,在具体应用时,必须考虑灵敏度与频率响应带宽的矛盾,根据具体应用要求与条件,来合理选用恰当的负载电阻。

(3) 热释电器件的噪声。热释电器件的基本结构是一个电容器,其输出阻抗很高,所以它后面常接有场效应管,构成源极跟随器的形式,使输出阻抗降低到适当数值。因此,热释电器件的噪声主要有电阻的热噪声、温度噪声和放大器噪声三种。

值得指出的是,温度无规则起伏的噪声,是一种始终存在着的、不可避免的噪声源,而其他噪声源,还可以通过改进器件的材料、电子电路、制作工艺等来减小甚至消除。通常,当热辐射为主要的热交换方式时,则温度起伏噪声的表现形式为背景起伏噪声。对非制冷红外热电探测器,理想的情况下只受到温度起伏噪声的限制。假定除了温度起伏噪声外,其他所有的像素以及系统的噪声均忽略不计,且吸收比与波长无关,则温度起伏的均方值为

$$\overline{\Delta T^2} = \frac{kT^2}{H} \quad (3-79)$$

式中, k 为波耳兹曼常量; T 为系统的温度; H 为系统的谐波均值。

如果忽略其他噪声,主要考虑温度噪声时,则噪声等效功率为

$$NEP = \left(\frac{4kT^2 G^2 \Delta f}{\alpha^2 A^2 P^2 \omega^2 R} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 + \left(\frac{T_N}{T} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-80)$$

由式 (3-80) 可看出,热释电器件的 NEP 具有随着调制频率的增高而减小的性质。

(4) 响应时间。热释电探测器件在低频段的电压灵敏度与调制频率成正比,在高频段则与调制频率成反比,仅在 $1/\tau_1 \sim 1/\tau_2$ 范围内, S_V 与 ω 无关。电压灵敏度高端半功率点取决于 $1/\tau_1$ 或 $1/\tau_2$ 中较大的一个,因而按通常的响应时间定义, τ_1 和 τ_2 中较小的一个,即热释电探测器件的响应时间。通常, τ_1 较大,而 τ_2 与负载电阻大小有关,多在几秒到几个微秒之间。随着负载的减小, τ_2 变小,灵敏度也相应减小。

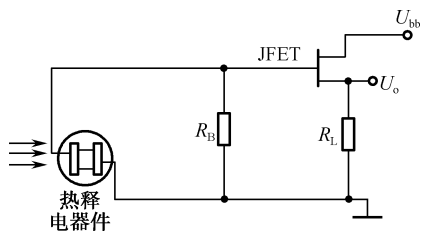


图 3-61 带前置放大器的热释电器件

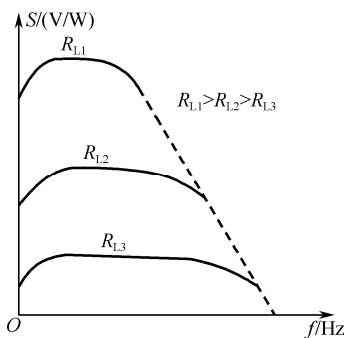


图 3-60 不同负载电阻热释电器件灵敏度与工作频率的关系

(5) 热释电探测器的阻抗特性。热释电探测器件几乎是一种纯电容性器件,由于其电容量很小,所以热释电探测器件的阻抗很高,因此要求必须配以高阻抗的负载(热释电探测器件的负载阻抗通常在 $10^9 \Omega$ 以上)。由于空气潮湿,表面沾污等原因,普通电阻不易达到这样高的阻值。而结型场效应管(JFET)的输入阻抗高,噪声又小,所以常用 JFET 器件作为热释电探测器件的前置放大器。图 3-61 表示出了



一种常用的电路，用 JFET 构成一种源极跟随器，以进行阻抗变换。

4. 热释电探测器对前置放大器的要求

由热释电探测器件的阻抗特性知道，为了提高灵敏度和信噪比，常把热释电探测器件同前置放大器做在一个管壳内。图 3-62 为热释电器件带有场效应管放大器组合件的结构图。由于热释电器件本身阻抗很高，达 $10^{10} \sim 10^{12} \Omega$ ，因此要求具有高输入阻抗 ($R_g = 10^{10} \Omega$ 以上)、低噪声、高跨导 ($g_m > 2000$) 的场效应管作为前置放大器，并且引线要尽可能短，最好将场效应管的栅极直接焊到器件的一只引脚上，并同时装入铜屏蔽壳内。

带有场效应管放大器的热释电器件的等效电路如图 3-63 所示。显然，其等效输出阻抗、电压和电流灵敏度等参数与工作频率等参数有关。对一定调制频率的光源，应选用窄带选频放大器，以降低噪声。低频使用时，应选用栅漏电流小的场效应管作前置放大；高频使用时，应选用电压噪声低的场效应管作前置放大。当热释电器件用于高频激光脉冲测量时，应接入低负载电阻 R_L ($R_L \ll R_g$)。此时，探测器的响应时间常数为 R_L 和 C 的乘积，即 $\tau = R_L C$ 。其中 $C = C_d + C_L$ ， C_d 为器件电容， C_L 为场效应管的输入电容。

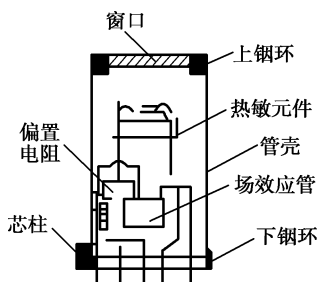


图 3-62 带场效应管放大器的热释电器件

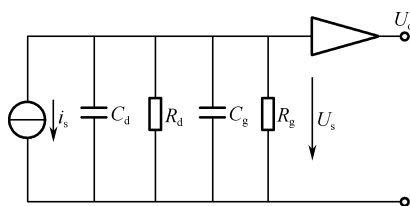


图 3-63 热释电器件的等效电路

5. 热释电探测器件的使用要点

热释电探测器件除具有一般热电探测器件的优点外，还具有机械强度、灵敏度、响应速度都很高的优点。根据它的工作原理，它只能测量变化的辐射，入射辐射脉冲宽度必须小于自发矢量的平均作用时间；辐射恒定时无输出；利用它来测量辐射体温度时，它的直接输出是背景与热辐射体的温差，而不是热辐射体的实际温度，因此要确定热辐射体实际温度时，必须另设一个辅助探测器，先测出背景温度，然后将背景温度与热辐射体的温差相加，即可得被测物的实际温度；此外，因各种热释电材料都存在一个居里温度，所以它只能在低于居里温度的范围内使用。

需特别指出的是，由于热释电晶体同时又是压电晶体，容易产生压电谐振，这就意味着在热释电效应上叠加了压电效应，而给出假信号，从而使得探测器件在高频下使用受到了限制，因此它对微震等应变十分敏感，所以在使用时必须注意减震防震。

3.4.4 热电探测器件在安防中的应用

1. 用热释电探测器件作被动红外探测报警

任何高于绝对零度的物体都会释放红外线，温度越高，红外辐射的峰值波长就越短。由于

热释电探测器的波长灵敏度在 $0.2\sim 20\ \mu\text{m}$ 范围内几乎是不变的,而人体可辐射出中心波长为 $9\sim 10\ \mu\text{m}$ 的红外线,因而就在芯片表面贴上截止波长为 $7\sim 10\ \mu\text{m}$ 的滤光片,正好适合于人体红外辐射的探测,于是就可得到专门只对人体敏感的热释电红外探测器。

热释电探测器用于防盗报警系统的电路构成方框图如图 3-64 所示,由菲涅尔透镜、热释电红外传感器、放大器、滤波器、电平比较器、驱动电路、继电器和报警电路等组成。

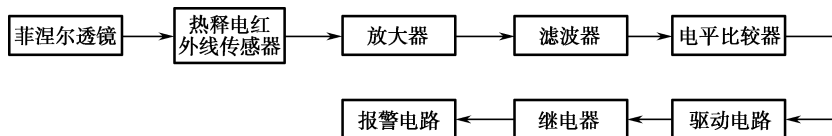


图 3-64 热释电防盗报警器电路构成框图

菲涅尔透镜的构造如图 3-65 所示,它是由聚乙烯材料注塑而成的薄片,在薄片上压制有三种不同宽度的分格竖条,单个竖条平面实际上是一些同心的螺旋线,其作用是聚集红外线能量,当人体在菲涅尔透镜前面通过时,它具有将连续的红外辐射分割成断续红外辐射的能力,从而形成红外脉冲。用这种菲涅尔透镜与放大电路相配合,可将信号放大 $70\ \text{dB}$ 以上,这样就可以测出 $10\sim 20\ \text{m}$ 范围内人的活动情况。

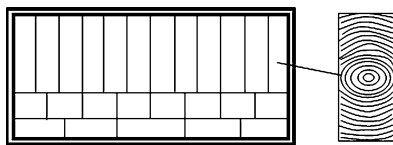


图 3-65 菲涅尔透镜构造

由前述可知,热释电效应所产生的电荷,会被空气中的离子中和而消失,即当环境温度稳定不变时, $\Delta T=0$,则热释电探测器无输出。当人体进入检测区时,由于人体温度与环境温度有差别,再加上人体是运动的,此时 $\Delta T\neq 0$,则热释电探测器有电压输出;若人体进入检测区后不动,则温度没有变化,热释电探测器也就没有输出了。因此,这种热释电探测器是一种专门探测人体或能辐射 $7\sim 10\ \mu\text{m}$ 范围内活动动物等的探测器。

2. 作测温仪

用热敏器件作测量温度的仪器比较实用,如过去某公司在—传染病期间用来监测人的发烧体温非常有效,从而可决定该人是否隔离,避免了传染事故的发生。

此外,武汉大学何民才教授曾利用热电堆作出用于炼钢高炉测高温的仪器产品,已被多个炼钢厂采用。

3. 作感温防火探测器

在火灾初始阶段,一方面有大量烟雾产生,另一方面物质在燃烧过程中释放出大量的热量,使周围环境温度急剧上升,感温探测器就是通过热电探测器件检测警戒范围中的某一点或某一线路周围温度变化时响应的火灾探测器。这种探测器将温度的变化转换为电信号而送到报警控制器处理,以达到报警的目的。根据监测温度参数的不同,根据其感热效果和结构形式可分为定温式、差温式及差定温组合式三种。



实际上,感温探测器是响应异常温度、温升速率和温差等参数的探测器。

(1) 定温式防火探测器。即温度上升到预定值时而响应的火灾探测器,它是在规定时间内,由火灾引起的温度上升超过某个定值时而启动报警的火灾探测器。它有线型和点型两种结构形式,其中线型结构的温度敏感元件呈线状分布,它所监视的区域是一条线带,当监测区域中某局部环境温度上升达到规定值时,可熔的绝缘物熔化使感温电缆中两导线短路,或采用特殊的具有负温度系数的绝缘物质制成的可复用感温电缆产生明显的阻值变化,从而产生火灾报警信号;点型结构定温式探测器是利用双金属片、易熔金属、热电偶或半导体热敏电阻等元件,在规定的温度值上,而产生火灾报警信号。

(2) 差温式防火探测器。即环境温度的温升速度超过一定值时而响应的火灾探测器,它是在规定时间内,由火灾引起的温度上升速率超过某个规定值时而启动报警的火灾探测器。它也有线型和点型两种结构形式:线型结构差温式火灾探测器是根据广泛的热效应而动作的,主要的感温元件有按面积大小蛇形连续布置的空气管,分布式连接的热电偶以及分布式连接的热敏电阻等;点型结构差温式火灾探测器是根据局部的热效应而动作的,主要感温元件有空气膜盒,半导体热敏电阻器件等。

在消防工程中,常用的差温式火灾探测器多是点型结构,差温元件多采用空气膜盒和热敏电阻。当火灾发生时,建筑物室内局部温度将以超过常温数倍的异常速率升高,膜盒型差温火灾探测器就是利用这种异常速率产生感应并输出火灾报警信号。其感热外罩与底座形成密闭的气室,只有一个很小的泄露孔能与大气相通,当环境温度缓慢变化时,气室内外的空气可通过泄露孔进行调节,使内外压力保持平衡。如遇火灾发生,环境温升速率很快,气室内空气由于急剧受热膨胀来不及从泄露孔外逸,致使气室内空气压力增高,将波纹片鼓起与中心接线柱相碰,于是接通了电触点,便发出火灾报警信号。这种探测器具有灵敏度高,可靠性好,不受气候变化影响的特性,因而应用十分广泛。

(3) 差定温组合式防火探测器。即兼有定温、差温两种功能的火灾探测器,它是结合了定温和差温两种作用原理并将两种探测器结构组合在一起的一种感温探测器。一般,它多是用半导体热敏电阻式感温器件等构成的一种点型组合式探测器。

在消防工程中,常见的差定温组合式火灾探测器是将差温式、定温式两种感温火灾探测器组装结合在一起,兼有两者的功能,若其中某一功能失效,则另一种功能仍然起作用。因此,大大提高了火灾监测的可靠性。差定温组合式火灾探测器一般多是膜盒式或半导体热敏电阻式等点型结构的组合式火灾探测器。

感温探测器对火灾发生时温度参数的敏感,其关键是由组成探测器的核心部件——热电探测器件决定。热电探测器件是利用某些物体的物理性质随温度变化而发生电信号变化的热敏感材料制成的,如易熔合金或热敏绝缘材料、双金属片、热电偶、热敏电阻、半导体材料等。定温、差定温探头各级灵敏度探头的动作温度分别不大于1级62℃、2级70℃、3级78℃。

感温式火灾探测器适宜安装于起火后产生烟雾较小的场所。平时温度较高的场所不宜安装感温式火灾探测器。

4. 作室外防护罩的温度控制

如Sunspro的室外全天候防护罩的控制电路原理如图3-66所示。

当防护罩内部温度低于-5℃时,热电探测器件测温的温控开关 S_1 接通,开始加热;高于5℃时,温控开关 S_1 断开,停止加热。当防护罩内部温度高于40℃时,温控开关 S_2 接通,开

始降温, 低于 35°C 时, 温控开关 S_2 断开, 停止降温。雨刷由 AC 220 V 继电器控制, 使用 AC 24 V 产品时, 由 AC 24 V 继电器控制, 但解码箱输出电流要大于 2.8 A。

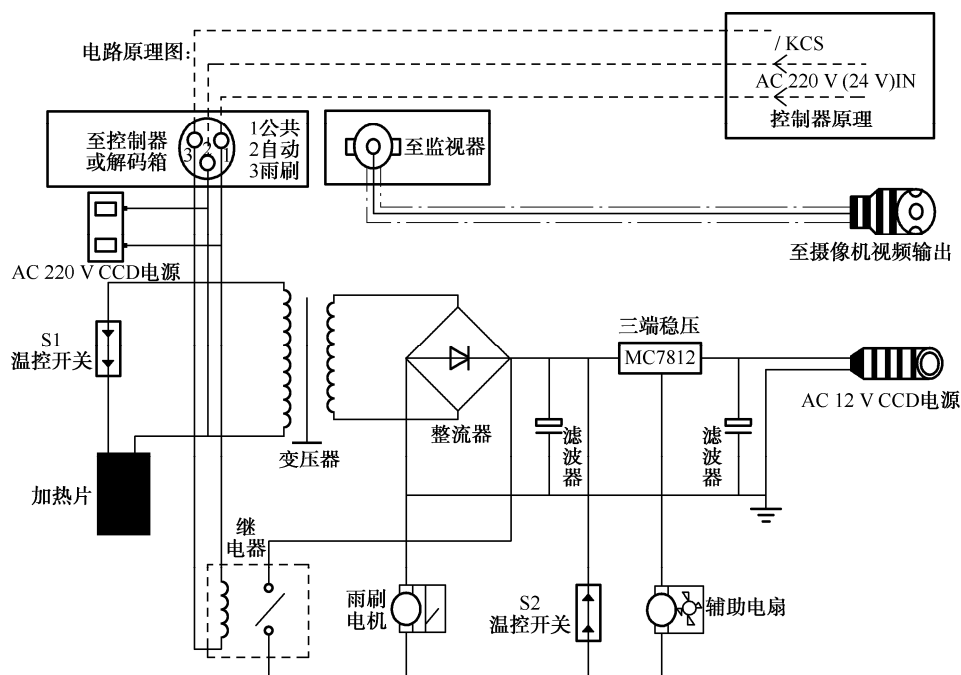


图 3-66 室外防护罩控制电路

有的室外全天候防护罩还有喷淋器, 其主要功能是向防护罩的前脸玻璃上喷水, 用于清扫防护罩前脸玻璃上的灰尘, 以配合刮水器完成对前脸玻璃的清洁。当控制器或解码器输出控制电压, 即可开启喷淋器的电磁阀, 控制微型泵将水喷向防护罩的前脸玻璃。需要指出的是, 配有喷淋器的防护罩应同时具有供水储水装置。

由于室外使用环境恶劣, 室外防护罩的强度一般比室内型高, 用料也大, 且抗锈蚀的要求也比室内型的高, 因此, 室外防护罩的重量要比室内防护罩重得多。

5. 作非制冷型红外焦平面阵列热像仪

热敏电阻或热释电探测器件不仅可用于测温, 还可用作红外焦平面阵列探测器。例如, 室温工作的非制冷型红外焦平面阵列热释电探测器, 易于制成平面形状, 具有与半导体硅集成电路工艺技术兼容等优点, 在市场中的推广前景很好, 尤其在其结构设计中, 通过适当调整热探测源、热绝缘结构, 以及 IC 热电转换电路, 能够很好地改善红外焦平面阵列探测器的综合性能。

光图像信息探测器件及其在 安防中的应用

4.1 光图像信息探测器件的类型与电视制式

第3章介绍的光辐射信息探测器件是一类单元器件，主要用于对“点源”的探测。本章介绍的光图像信息探测器件，即光电成像器件（也称摄像器件或图像传感器），是一类能输出图像信息的阵列器件，主要用于对“面源”的探测。

4.1.1 光电成像器件的类型

光电成像器件从成像原理上，可分为扫描型与非扫描型两类；从人的观察应用上，又可分为直视型与非直视型两类，如图4-1所示。

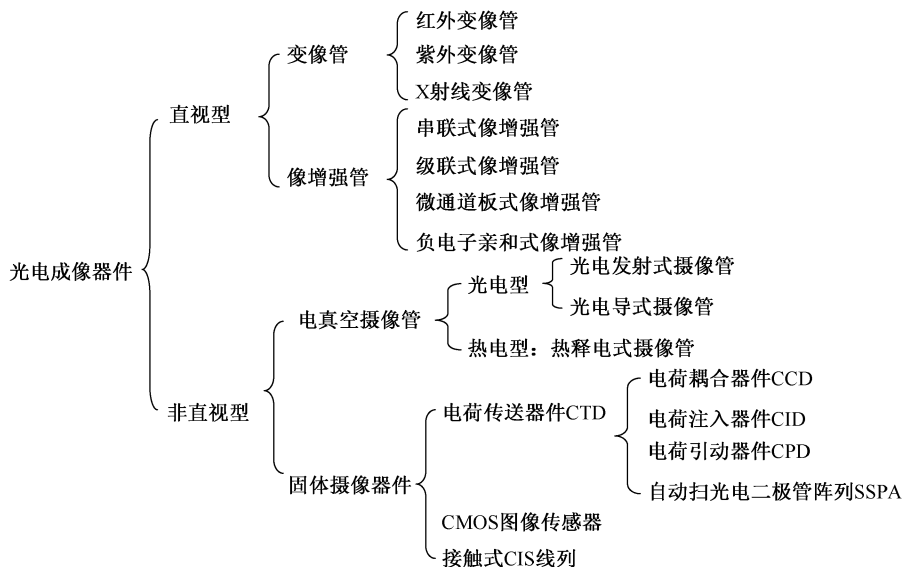


图 4-1 光电成像器件的类型

1. 直视型光电成像器件

直视型（即非扫描型）光电成像器件可直接显示输出供人观察的图像，因而也称为像管。它基于光电发射效应，由光电阴极（像敏面）、电子透镜和荧光屏（显像面）等三部分构成。这种器件完成光学图像的光谱变换（即将不可见图像变为可见图像的变像管）或使图像亮度增强的变换（即像增强管）。直视型光电成像器件可拓展人的视觉光谱范围和视觉灵敏度，但它只是实时实地的图像观察模式，而无法对图像进行存储和传输，因而不能实现远程观察。

2. 非直视型光电成像器件

非直视型（即扫描型）光电成像器件又称为摄像器件。这种器件通过电子束扫描或固体自扫描等方式，将被摄景物经光学系统成像在器件的光敏面（或靶面）上的二维图像转变为一维时序信号输出来。这种输出不能直接观察到图像，因而是一种非直视型光电成像器件。这种运载图像信息的一维时序信号就称为视频信号，如将这种视频信号送入监视器，控制显像管的电子枪的强度，显像管的电子枪与摄像器件作同步扫描，可将摄像器件所摄取的图像显示出来。显然，这种非直视型光电成像器件能对图像进行存储和传输，并能实现远程观察。

作为摄像机的成像器件是真空摄像管和固体摄像器件。真空摄像管过去使用最多的是氧化铅（PbO）靶光导摄像管和硅靶光导摄像管。由于固体摄像器件的出现，以无可比拟的优点淘汰了真空管摄像器件，因而本书不再介绍。目前，主要应用的是固体摄像器件。

大多数固体摄像器件均属于电荷传送器件 CTD，如电荷耦合器件（Charge Coupled Device, CCD）、电荷注入器件 CID、电荷引动器件 CPD 及自扫描光电二极管阵列 SSPA。另有一类主要是大有发展前途的 CMOS 摄像器件，以前单独介绍的新型的 LBCAST 图像传感器也应归入其中，还有接触式 CIS 线列。

本章除介绍直视型光电成像器件外，重点介绍应用广泛的电荷耦合器件 CCD、极具潜质的 CMOS 摄像器件，以及应用逐渐增多的特种光电成像器件。

4.1.2 电视扫描方式及制式

1. 电视扫描方式

为使大家容易理解，这里仍以大家所熟悉的 CRT 扫描方式为例来说明。电视图像的监视器与电视接收机的显示部分的原理是相同的，它们都是应用荧光物质的电光转换特性来显示图像的。电视图像扫描分为逐行扫描与隔行扫描两种方式，通过这两种扫描方式摄像机将景物图像分解成为一维视频信号，图像显示器将一维视频信号合成电视图像，而且摄像机与图像显示器必须采用同一种扫描方式。

显像管的电子枪装有水平和垂直两个方向的偏转线圈，线圈中分别流过如图 4-2 所示的锯齿波电流，电子束在偏转线圈形成的磁场作用下同时进行水平方向和垂直方向的偏转，完成对显像管荧光屏的扫描。

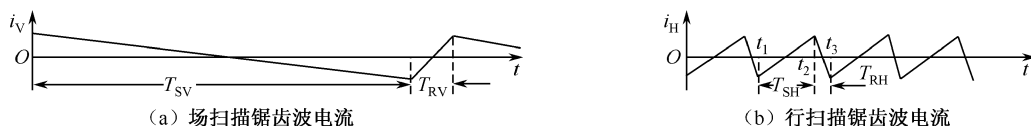


图 4-2 逐行扫描电流波形

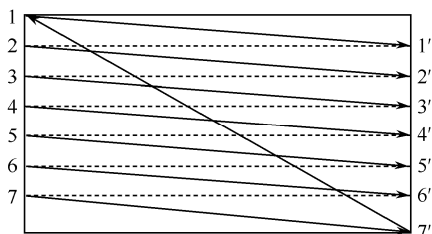


图 4-3 逐行扫描方式

在行、场扫描电流的同时作用下，电子束受水平偏转力和垂直偏转力的合力作用进行扫描。由于电子束在水平方向的运动速度远大于垂直方向的运动速度，因而在屏幕上电子束的运动轨迹（一条条的光栅）为如图 4-3 所示的稍微倾斜的水平直线。图 4-3 即逐行扫描，图中一场只有 7 行水平光栅，因此光栅的水平度很差。当一场中很多行时（如几百行），行扫描的水平度将很高，即一场图像由很多扫描光栅构成。无

论是行扫描的扫描回程，还是场扫描回程都不希望电子束使荧光屏发光，即在回扫时不让荧光屏发光，这就需要加入行消隐与场消隐脉冲，使电子束在行逆程与场逆程期间截止。实际上，行消隐脉冲的宽度稍大于行逆程时间，场消隐脉冲的宽度也大于场逆程时间，以确保图像质量。

逐行扫描方式中的每一场都包含着行扫描的整数倍，这样重复的图像才能被稳定地显示。显然，逐行扫描的帧频与场频相等。对于人眼来说，高于 48 Hz 变化的图像的闪动是不能分辨的，因此，要获得稳定的图像，要求场频与帧频都必须高于 48 Hz。

根据人眼对图像的分辨能力所确定的扫描的水平行数至少应大于 600 行，因此，对于逐行扫描方式，行扫描频率必须大于 29 kHz 才能保证人眼视觉对图像的最低要求。这样高的扫描频率，无论对摄像系统还是对显示系统都提出了更高的要求。为了降低扫描频率，又能保证人眼视觉对图像分辨率及闪耀感的要求，人们提出了隔行扫描和显示图像的方法。

隔行扫描采用如图 4-4 所示的扫描方式，由奇、偶两场构成一帧。奇数场由 1、3、5…等奇数行组成，偶数场由 2、4、6…等偶数行组成，奇、偶两场合成一帧图像。人眼看到的变化频率为场频，人眼分辨的图像是一帧，一帧图像由奇、偶两场扫描形成，帧行数为场行数的 2 倍。这样，既提高了图像分辨率又降低了行扫描频率，是一种很有实用价值的扫描方式。因此，这种扫描方式一直为电视系统和视频监控系统所采用。

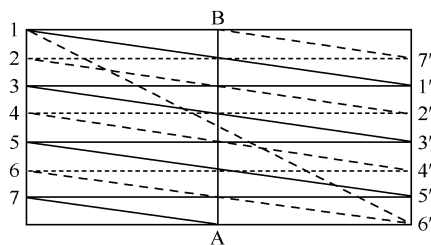


图 4-4 隔行扫描方式

两场光栅均匀交错叠加，是对隔行扫描方式的基本要求，否则图像的质量将大为降低。因此，要求隔行扫描必须满足：

- (1) 要求下一帧图像的扫描起始点应与上一帧起始点相同，以确保各帧扫描光栅重叠。
- (2) 要求相邻两场光栅必须均匀地镶嵌，以确保获得最高清晰度。

从第一条要求考虑，每帧扫描的行数应为整数；若在各场扫描电流都一样的情况下，要满足第二条要求，每帧均应为奇数。因此，每场的扫描行数就要出现半行的情况。目前，我国现行的隔行扫描电视制式，就是采用每帧扫描行数为 625 行，每场扫描行数为 312.5 行。

2. 电视制式

广播电视系统中采用的信号传输和接收规则称为电视制式,按电视制式输出的一维时序电信号就是视频信号。根据科技发展水平、电网制式、人眼视觉特性及对电视系统的需求等,可确定电视画面的宽高比、帧频、场频、行频等,这些是影响电视系统性能的重要参数。

世界各国采取的彩色电视制式主要有 NTSC 制(美国制)、PAL 制(西德制)和 SECAM 制(法国制)三类。NTSC 制 1953 年由美国研制成功,主要用于北美、日本和东南亚各国,该电视制式的场频为 60 Hz,隔行扫描每帧扫描行数为 525 行,伴音、图像的载频带宽为 4.5 MHz。PAL 制在 1962 年由德国研制成功,由于它是 NTSC 制基础上改进而形成的,所以较 NTSC 制优越,因此我国也采用这一制式。

我国现行电视制式(黑白 CCIR,彩色 PAL 制)的主要参数为:

- 电视图像的宽高比为 4:3 或 16:9;
- 场频为 50 Hz,帧频为 25 Hz;
- 隔行扫描每帧画面的扫描行数为 625 行,行频为 15 625 Hz,每帧画的水平分辨率为 466 线,垂直分辨率为 400 线;
- 场周期为 20 ms,其中正程扫描时间为 18.4 ms,逆程扫描时间为 1.6 ms;
- 行周期为 64 μ s,其中行正程为 52 μ s,行逆程扫描时间为 12 μ s;
- 伴音、图像的载频带宽为 6.5 MHz。

4.2 电荷耦合器件 CCD 及其在安防中的应用

1970 年,美国贝尔实验室的 W. B. Boyle 和 G. E. Smith 等人成功地研制出了新型的电荷耦合器件(CCD),从而揭开了电荷传输器件的序幕。随着光电与微电子技术的发展,CCD 的发展异常迅速,并且在国民经济、军事、安防、科研直至生活等各个领域,均展现了十分广阔的应用。

4.2.1 CCD 的结构及原理

1. CCD 的基本结构

CCD 是在 MOS 晶体管的基础上发展起来的,其基本结构是 MOS(金属-氧化物-半导体)电容结构,如图 4-5 所示,它是在半导体 P 型硅(Si)作为衬底的表面上用氧化的办法生成一层厚度为 100~150 nm 的 SiO_2 ,再在 SiO_2 表面蒸镀一层金属(如铝),在衬底和金属电极间加上一个偏置电压(称为栅电压),就构成了一个 MOS 电容器。所以,CCD 是由一行行紧密排列在硅衬底上的 MOS 电容器阵列构成的。若金属电极与半导体之间施加的栅电压为 V_G ,则电压一部分降落在氧化层(SiO_2)上,而另一部分降落在半导体与 SiO_2 界面的半导体表面层,形成表面电势 ϕ_s ,即

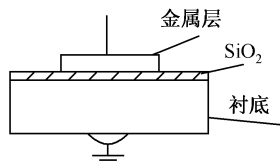


图 4-5 CCD 的基本结构

$$U_G = U_0 + \phi_s \quad (4-1)$$

式中, U_0 是降落在氧化层上的电压。由于氧化层是绝缘的, 所以在绝缘层中无电荷, 其电场是均匀的。当氧化层厚度一定时, 半导体上的表面电势 ϕ_s 由加在电极上的电压 U_G 决定。

2. CCD 的工作原理

(1) 光电转换。当一束信号光投射到 MOS 电容上时, 光子穿过透明电极及氧化层, 进入 P 型硅 (Si) 衬底, 衬底中处于价带的电子将吸收光子的能量而跃入导带, 从而产生电子-空穴对。它们在外加电场的作用下, 就会分别向电极两端移动, 因而产生光生信号电荷。

(2) 电荷的存储。当栅极施加正偏压 U_G (此时 U_G 小于 P 型半导体的阈值电压 U_{th}) 后, 空穴被排斥, 产生耗尽区。当 $U_G > U_{th}$ 时, 半导体与绝缘体界面上的表面势 ϕ_s 变高到将半导体体内的电子 (少数载流子) 吸引到表面, 形成一层极薄的 (约 $10^{-2} \mu\text{m}$) 但电荷浓度很高的反型层。信号电子所以被吸引到氧化层与半导体的交界面处, 是因为那里的势能最低, 即存在势阱。据估算, 势阱中能存储的电子数可高达 10^6 个。表面势与栅极电压 U_G 、氧化层厚度 d_{ox} 有关, 即与 MOS 电容容量 C_{ox} 与 U_G 的乘积有关, 因此, 势阱的横截面积取决于栅极电极的面积 A , 所以 MOS 电容存储信号电荷的容量为

$$Q = C_{ox} U_G A \quad (4-2)$$

(3) 电荷的转移。三相 CCD 中电荷的转移过程如图 4-6 所示。取 CCD 中四个彼此靠得很近的电极来观察, 若开始有一些电荷存储在偏压为 10 V 的第二个电极下面的深势阱里, 其他电极上均加有大于阈值的较低电压 (如 2 V)。设图 4-6 (a) 为零时刻 (初始时刻), 过 t_1 时刻后, 各电极上的电压变为如图 4-6 (b) 所示, 第二个电极仍保持为 10 V, 第三个电极上的电压由 2 V 变到 10 V, 因这两个电极靠得很近 (几 μm), 它们各自的对应势阱将合并在一起。即原来在第二个电极下的电荷变为这两个电极下势阱所共有, 如图 4-6 (b) 和图 4-6 (c) 所示。若此后电极上的电压变为图 4-6 (d) 所示, 第二个电极电压由 10 V 变为 2 V, 第三个电极电压仍为 10 V, 则共有的电荷转移到第三个电极下面的势阱中, 如图 4-6 (e) 所示。由此可见, 深势阱及电荷包向右移动了一个位置。通常把 CCD 电极分为几组, 每一组称为一相, 并施加同样的时钟脉冲。CCD 的内部结构决定了使其正常工作所需的相数。图 4-6 所示的结构需要三相时钟脉冲, 其波形如图 4-6 (f) 所示, 这样的 CCD 称为三相 CCD。其电荷传输方式必须要在三相交叠脉冲的作用下才能以一定的方向, 逐单元地转移。

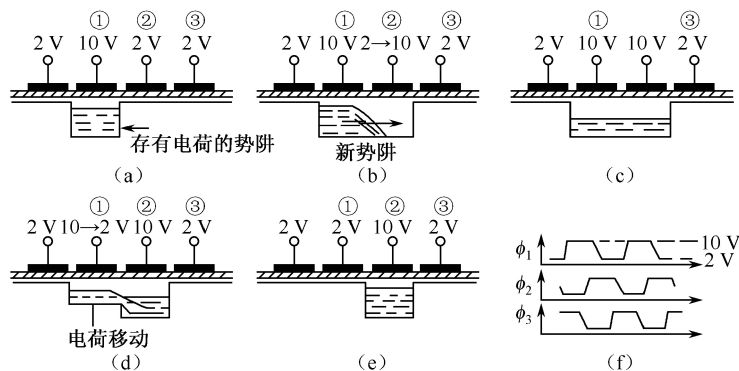


图 4-6 三相 CCD 中电荷的转移过程

显然, CCD 电极间隙必须很小, 如电极间隙比较大, 则两相邻电极间的势阱将被势垒隔开, 而不能合并, 电荷也不能从一个电极向另一个电极平滑地转移。能够产生电荷完全耦合(这就是电荷耦合器件名称的由来, 显然它不是什么光耦合器件)条件的最大间隙一般由具体电极结构、表面态密度等因素决定。理论计算和实验证实, 间隙的长度应小于 $3\mu\text{m}$, 这大致是同样条件下半导体表面深耗尽区宽度的尺寸。当然, 如果氧化层厚度、表面态密度不同, 结果也会不同。但对绝大多数 CCD, $1\mu\text{m}$ 的间隙长度是足够小的。

值得指出的是, 我们通常所说的 CCD 的位数的位, 不是这里的一个栅电极。对三相 CCD 来说, 电荷包转移了三个栅电极是时钟脉冲的一个周期, 我们把这三个栅电极称为 CCD 的一个单元或 CCD 的一位, 也就是我们通常所说的一个像元。显然, 对二相 CCD 来说, 就是两个栅电极为一位; 对四相 CCD 则一位是四个栅电极了, 所以千万不能混淆。

如果将一系列的 MOS 电容器排列起来, 并以两相、三相或四相工作方式把相应的电极并联在一起, 并在每组电极上加上一定时序的驱动脉冲, 这样就具备了 CCD 的基本功能。

以电子为信号电荷的 CCD 称为 N 型沟道 CCD, 简称为 N 型 CCD; 而以空穴为信号电荷的 CCD 称为 P 型沟道 CCD, 简称为 P 型 CCD。由于电子的迁移率(单位场强下的运动速度)远大于空穴的迁移率, 因此, N 型 CCD 比 P 型 CCD 的工作频率高得多。

由于光敏二极管和 MOS 电容器相比, 具有灵敏度高、光谱响应宽、蓝光响应好、暗电流小等特点, 因而目前 CCD 器件均采用光电二极管代替过去的 MOS 电容器。将光电二极管反向偏置, 就可在光电二极管中产生一个定向电荷区(称为耗尽区)。在定向电荷区中, 光生电子和光生空穴分离, 光生电子被收集在空间电荷区中。空间电荷区对带负电的电子是一个势能特别低的区域, 即势阱。投射光产生的光生电荷就储存在这个势阱之中, 势阱能够储存的最大电荷量又称为势阱容量, 势阱容量与所加栅压近似成正比。

CCD 要想同其他器件一样加上电源就可以用, 还必须要有电荷的输入、输出机构及外围驱动电路才行。

3. CCD 的输入/输出及外围驱动电路

(1) CCD 的输入机构。CCD 的输入机构即电荷的注入, 一般电荷的注入可分为两类: 光注入和电注入。

① 光注入。当光照射到 CCD 硅片上时, 在半导体体内产生电子-空穴对, 其栅极附近的多数载流子被栅极电压排开, 少数载流子则被收集在势阱中形成信号电荷。光注入方式又可分为正面照射式及背面照射式。CCD 摄像器件的光敏单元即为光注入方式, 其光注入电荷 Q_{IP} 为

$$Q_{IP} = \eta q \Delta n_{eo} A T_c \quad (4-3)$$

式中, η 为材料的量子效率; q 为电子电荷量; Δn_{eo} 为入射光的光子流速率; A 为光敏单元的受光面积; T_c 为光注入时间。

② 电注入。CCD 通过输入机构对信号电压或电流进行采样, 将信号电压或电流转换为信号电荷。电注入的方法很多, 这里仅介绍常用的电流注入法。

图 4-7 所示为电流注入法, 由 N^+ 扩散区和 P 型衬底构成注入二极管。IG 为 CCD 的输入栅, 其上加适当的正偏压以保持开启, 并作为基准电压。模拟输入信号 U_{IN} 加在

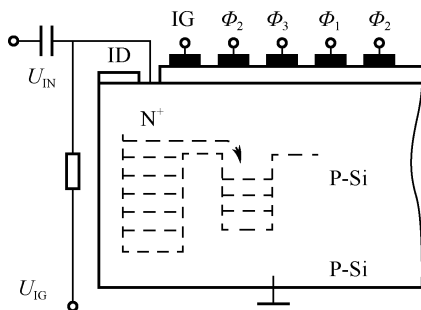


图 4-7 电流注入法

输入二极管 ID 上。当 ϕ_2 为高电平时, 可将 ID 极 (N^+ 区) 看作 MOS 场效应管的源极, IG 为栅极, 而 ϕ_2 为其漏极。当它工作在饱和区时, 输入栅下沟道电流为

$$I_s = \mu W / L_G \cdot C_{OX} / 2 (U_{IN} - U_{IG} - U_{th})^2 \quad (4-4)$$

式中, W 为信号沟道宽度; L_G 为注入栅 IG 的长度; μ 为载流子表面迁移率; C_{OX} 为注入栅 IG 的电容; U_{IG} 为输入栅的偏置电压; U_{th} 为硅材料的阈值电压。

在经过 T_c 时间的注入后, ϕ_2 下势阱的信号电荷量为

$$Q_s = \mu W / L_G C_{OX} / 2 (U_{IN} - U_{IG} - U_{th})^2 T_c \quad (4-5)$$

由式 (4-5) 可见, 这种注入方式的信号电荷 Q_s 不仅依赖于 U_{IN} 和 T_c , 而且与输入二极管所加偏压的大小有关, 因此 Q_s 与 U_{IN} 不是一种线性关系。

(2) CCD 的输出机构。在 CCD 中, 信号电荷在转移过程中与时钟脉冲没有任何电容耦合, 但在输出端则不可避免。因此, 要选择适当的输出电路, 使之尽可能地减小时钟脉冲容性馈入输出电路的程度, 即减小其容性干扰。目前, CCD 输出方式很多, 这里介绍一种电流输出方式。

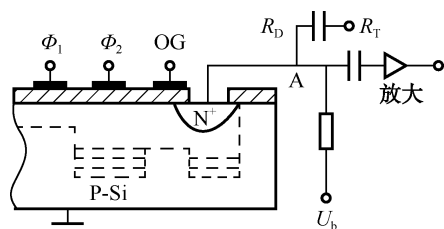


图 4-8 电流输出方式

图 4-8 所示是使用较多的一种电流输出方式。当信号电荷转移到最末一个电极 ϕ_2 下的势阱中后, 若 ϕ_2 电极上的电压由高变低时, 信号电荷将通过加有恒定电压的输出栅 OG 下的势阱, 进入反向偏置二极管 (即图中 N^+ 区) 中。因为这个二极管是反向偏置, 它会形成一个深陷信号电荷的势阱, 所以转移到 ϕ_2 电极下的电荷包会越过输出栅, 流入这个深势阱中。直流偏置的输出栅 OG 用来使漏扩散和时钟脉冲之间退耦。由反向偏置二极管收集来的信号电荷, 使 A 点的电位发生变化。所以, 可用 A 点的电位来检测注入输出二极管中的电荷量。若二极管输出电流为 I_D , 则注入二极管中的信号电荷量 Q_s 为

$$Q_s = I_D dt \quad (4-6)$$

由此看出, 输出电流 I_D 与信号电荷量 Q_s 呈线性关系。最后, A 点的电位变化通过隔直电容由场效应管放大器输出。此外, 在图 4-8 中, A 点上面的场效应复位管用于对输出二极管的深势阱复位, 它导通让剩余电荷流入电源, 从而使 A 点的电位恢复到原起始的电平, 准备接收新的信号电荷。

(3) CCD 的外围驱动电路。为说明 CCD 需要外围驱动电路, 现以日本东芝生产的线阵 2048 位 TCD142D 为实例进行介绍。线阵 CCD 国外已很成熟, 目前已达 7000 位, 国内只生产了低位数。TCD142D 器件的管脚引线排列情况如图 4-9 所示。由图看出, 该器件为二相 CCD: 需要相差 180° 的二路驱动脉冲 ϕ_1 与 ϕ_2 , 一路转移控制脉冲 ϕ_{sh} , 一路复位脉冲 ϕ_R 。其驱动脉冲的波形如图 4-10 所示。

值得注意的是, 由于结构上的安排, 器件的 OS 输出端首先输出 12 个虚设单元的脉冲, 再输出 51 个暗信号脉冲后才连续输出 2 048 个信号脉冲, 最后输出 11 个暗电流脉冲, 接下来输出多余无信号脉冲。由于该器件是两列并行传输, 所以在在一个 ϕ_{sh} 周期中至少要有 1 061 个 ϕ_1 脉冲, 即 $T_{SH} > 1061 \times T_1$ 。图 4-10 中的 ϕ_R 是复位脉冲, 复位一次输出一个光信号。器件的补偿输出 DOS 端, 用于检取驱动脉冲 (尤其复位脉冲) 对输出电路的容性干扰信号, 若将 OS 端与 DOS 端的输出分别送到差分放大器的两个输入端, 则在输出端将得到被放大的没有驱动脉冲干扰的光电信号。

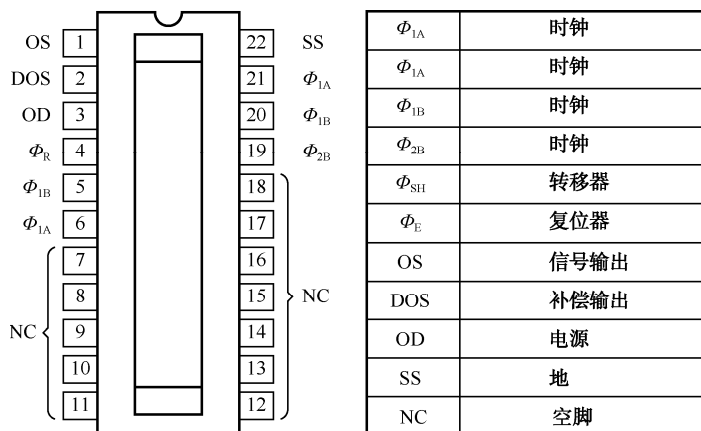


图 4-9 TCD142D 管脚排列图

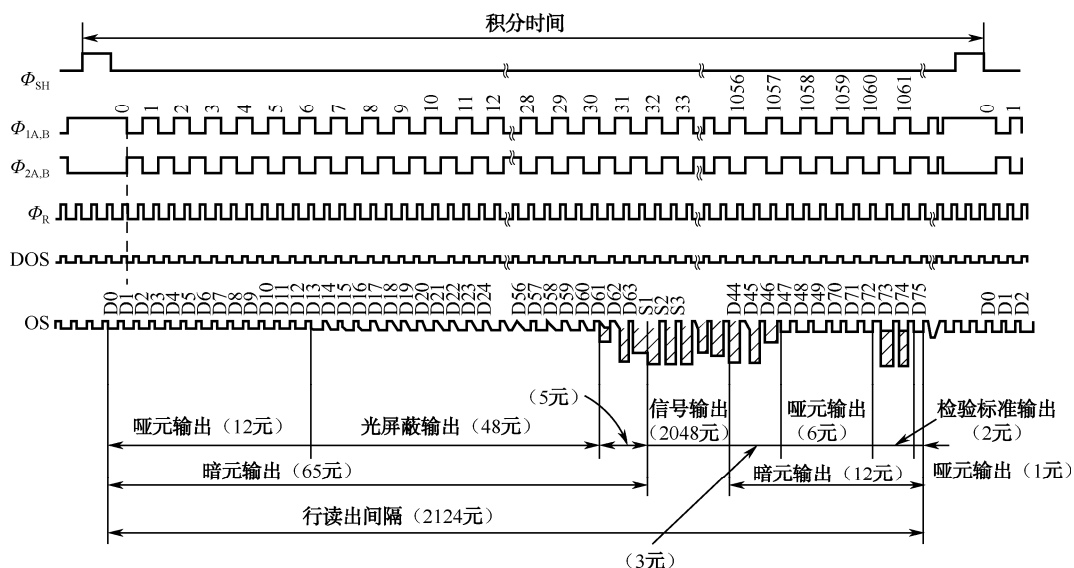


图 4-10 TCD142D 摄像机驱动时钟脉冲

由图 4-9 与图 4-10 可看出, TCD142D 的外围驱动电路必须由两部分组成, 即脉冲产生电路与驱动电路。据此, 设计的原理电路框图如图 4-11 所示。

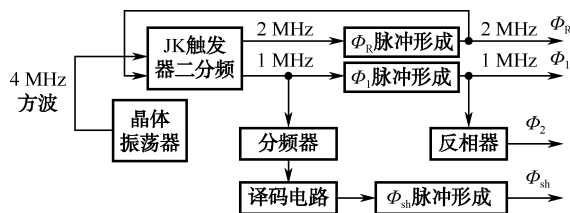


图 4-11 TCD142D 外围电路框图

由图 4-11 可知, 由晶体振荡器输出频率为 4 MHz 的方波脉冲, 经 JK 触发器分频得到频率为 2 MHz 的方波脉冲, 将 4 MHz 与 2 MHz 脉冲相与即经 Φ_R 脉冲形成电路而形成脉冲占空



比为 1:3 的频率为 2 MHz 的 ϕ_R 脉冲;将 ϕ_R 脉冲再经 JK 触发器分频而产生频率为 1 MHz 的脉冲;经 ϕ_1 脉冲形成电路而形成脉冲为 1 MHz 的 ϕ_1 脉冲;将 ϕ_1 脉冲经反相器反相后而形成 ϕ_2 脉冲 (1 MHz);将 1 MHz 的脉冲送入分频器,经译码电路而由 ϕ_{sh} 脉冲形成电路而产生周期 $T_{sh} > 1\,061\,\mu s$ 的转移控制脉冲 ϕ_{sh} 。至此, TCD142D 所需的四路脉冲均已产生。这四路脉冲经反相器反相,再经阻容加速电路送至 DS0026 驱动器以驱动 TCD142D 进入正常工作。DS0026 驱动器实际是一驱动门电路,它将电平由 5 V 转为 12 V,并反相。

显然,三相 CCD 外围驱动电路的配置,需围绕要产生相位差 120° 的三相驱动脉冲进行。如可用一片 4 联 D 触发器产生三相交叠脉冲,三个 D 触发器的时钟端 CK 联在一起,接到晶体振荡器的输出端,三个 D 触发器的复位端 R 也联在一起,接至开机自动复位电路上。至于 ϕ_{sh} 与 ϕ_R , 根据器件要求设计配置电路即可。

4.2.2 CCD 的类型

1. 按驱动脉冲的相数分

(1) 二相 CCD。对于单层金属化电极结构,为了保证电荷定向转移,驱动脉冲至少需要三相。因为当信号电荷自 ϕ_2 电极向 ϕ_3 电极转移时,在 ϕ_1 电极下面要形成势垒,以阻止电荷倒流。如果用二相脉冲驱动,就必须在电极结构中设计并制造出某种不对称性,即由电极结构本身保证电荷转移的定向性。产生这种不对称性最常用的方法,是利用绝缘层厚度不同的台阶以及离子注入产生的势垒。现在多用二相硅铝交叠栅结构,这种交叠栅结构的第一层电极采用低电阻率多晶硅;第二层电极采用铝栅,其栅下绝缘厚度与硅栅下不同,因而在相同栅压下形成势垒。相邻的一个铝栅(表面电极)和一个硅栅(SiO_2 中的电极)并联构成一相电极,加时钟脉冲 ϕ_1 ;另一相电极加时钟脉冲 ϕ_2 。相对于硅栅,铝栅下面是势垒,其作用是将各个信号电荷包隔离,并限定电荷转移的方向。由于电荷将处在势阱比较深的右半部内,厚氧化区下方势垒阻挡住电荷,从而使电荷只能向右转移。

(2) 三相 CCD。目前多用三相交叠硅栅结构,即使电极间隙极窄、转移沟道封闭的 CCD 的方法。最常见的是三层多晶硅交叠栅,其电极间隙仅为电极间氧化层的厚度,只有几百毫微米,且单元尺寸也小,沟道是封闭形式,因而广泛采用。在工艺过程中,采用氮化硅是在腐蚀多晶硅电极图形时,保护下面的氧化层。同样的电极结构也可以通过不采用氮化硅的工艺流程得到,即在每组电极下面重新生长氧化层。此外,还曾经用铝电极制成交叠栅结构,用阳极氧化工艺提供电极之间的绝缘层的方法。

(3) 四相 CCD。四相 CCD 的电极结构有:用两层金属(如铝)、电极中间淀积 100 nm 厚

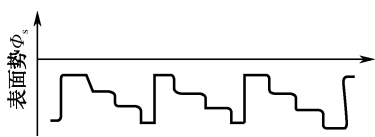


图 4-12 四相器件的表面势分布

的二氧化硅做绝缘;与多晶硅-铝交叠栅结构相似,只是各电极下绝缘层厚度相同,各电极面积也相同;用两层多晶硅电极。四相 CCD 虽然时钟驱动电路比较复杂,但其优点是连接两个电荷包之间有双重势垒相隔,这有助于提高转移效率;电荷在转移过程中由于表面势分布呈台阶状(如图 4-12 所示),因而不会产生二、三相转移过程中出现的“过冲现象”;

与三相、二相器件相比,较为适应很高的时钟频率(如 100 MHz),波形接近正弦的驱动脉冲。

2. 按电荷转移的沟道位置分

(1) 表面沟道 CCD (简称 SCCD)。前面所介绍的 CCD, 其信号电荷的转移沟道在半导体与氧化层交界的半导体表面, 所以都是表面沟道 CCD。这种 SCCD 除存储容量大一些外, 界面态会引起信号电荷的转移损失与噪声。为克服其缺点, 而引入了下列结构。

(2) 体沟道 CCD (简称 BCCD)。这是从结构设计方面采取提高转移效率的措施。为了避免界面态对信号电荷的俘获, 在薄氧化层下用离子注入, 扩散或外延的方法做成与衬底导电类型相反的区域, 如图 4-13 (a) 所示。利用重掺杂 N^+ 输出二极管 N 型表面层加足够的偏压 (相对于 P 型衬底为正), 使 N 掺杂的电子全部被扫出。然后给时钟栅极加偏压, 使电位最小值在 N 型层形成, 而不在半导体表面, 从而使电荷在体内转移 (也称埋沟)。

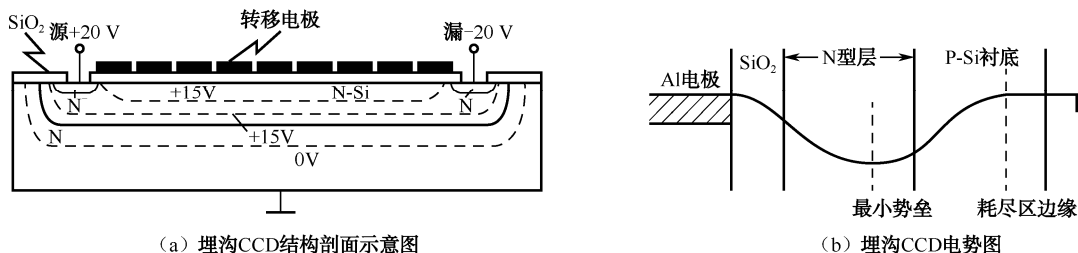


图 4-13 埋沟 CCD

由于在沟道末端的反向偏置二极管, 使整个 N 型区和邻近的 P 型衬底的一部分可动载流子耗尽, 如图 4-13 (b) 所示的电势剖面图, 这里画的是电势的负值。其显著特点是最小电势能偏离 Si-SiO₂ 界面, 这就意味着信号电荷在硅体内转移, 而消除了界面态对信号电荷的俘获, 同时也意味着自由载流子迁移率的大小接近于体内的值。这两种因素增加了转移效率, 而减少了金属栅与沟道的电容。但电容过小, 造成很深的势阱, 这种深势阱影响栅极下的势阱不能恰当的控制信号的存储与转移。因此, 在工艺上采用电阻栅结构或交叠栅结构, 来控制电极间的间隙不得超过氧化层的厚度, 使信号电荷在沟道内转移, 从而避免了界面态俘获效应的影响。

这种体沟道也称为隐埋沟道, 与 SCCD 相比, BCCD 的特点是:

- 转移速度快, 工作频率高;
- 转移损失小, 转移效率高;
- 噪声低;
- 存储容量比 SCCD 小一个数量级。

为解决势阱电容小的缺点, 还可采取在 P 型 Si 衬底轻掺杂 N 型的外延层上再注入 N^+ 层, 这种结构称为蠕动 CCD, 即所谓的 PCCD。

由于 BCCD 有低噪声的特点, 所以多用于低照度摄像。

3. 按光敏单元的排列分

(1) 线阵 CCD (CCLID)。线阵 CCD 摄像器件有单、双沟道线阵两种基本形式。三相单沟道线阵 CCD 的结构如图 4-14 所示。由图可见, 光敏阵列与转移区-移位寄存是分开的, 移位寄存器被遮挡。这种器件在光积分周期里, 光栅电极电压为高电平, 光敏区在光的作用下产生电荷存于光敏 MOS 电容势阱中。当转移脉冲到来时, 线阵光敏阵列势阱中的信号电荷并行转移



到 CCD 移位寄存器中，最后在时钟脉冲的作用下一位位地移出器件，形成视频脉冲信号。这种结构的 CCD 的转移次数多、效率低、调制传递函数较差，只适用于像敏单元较少的摄像器件。

图 4-15 为双沟道线阵摄像器件，它具有两列 CCD 移位寄存器 A 与 B，分列在像敏阵列的两边。当转移栅 A 与 B 为高电位（对于 N 沟器件）时，光积分阵列的信号电荷包同时按箭头方向转移到对应的移位寄存器内，然后在驱动脉冲的作用下，分别向右转移，最后以视频信号输出。显然，同样像敏单元的双沟道线阵 CCD 要比单沟道线阵 CCD 的转移次数少一半，它的总转移效率也大大提高。故一般高于 256 位的线阵 CCD 都为双沟道型的。

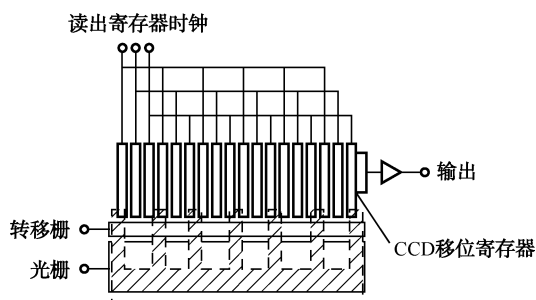


图 4-14 单沟道线阵 CCD 结构

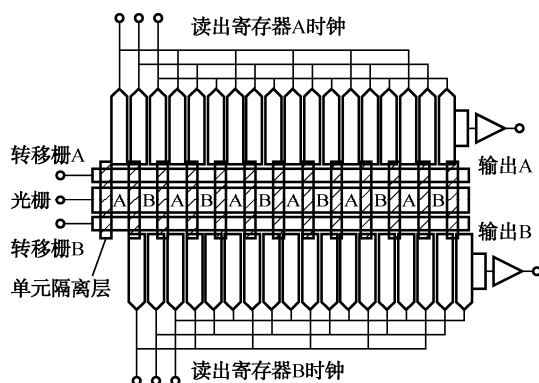


图 4-15 双沟道线阵 CCD 结构

(2) 面阵 CCD (CCAIID)。按一定的方式将一维线阵 CCD 的光敏单元及移位寄存器排列成二维阵列，即可以构成二维面阵 CCD。由于排列和组成方式不同，面阵 CCD 有许多种形式，但其基本形式是下面两种。

① 帧转移型面阵 CCD 的结构。三相面阵帧转移型 CCD 的结构，如图 4-16 所示，它由成像区（光敏区）、暂存区和水平读出寄存器三部分构成。成像区由并行排列的若干电荷耦合沟道组成（图中的虚线方框），各沟道之间用沟阻隔开，水平电极横贯各沟道。假定有 M 个转移沟道，每个沟道有 N 个成像单元，整个成像区共有 $M \times N$ 个单元。暂存区的结构和单元数都和成像区相同。暂存区与水平读出寄存器均被遮蔽。

这种面阵 CCD 的特点是：结构简单，可正、反两面光照，灵敏度较高，光敏单元的尺寸可以很小，容易做成高分辨率的器件，并使其模传递函数 MTF 较高。但光敏面积占总面积的比例小，图像有拖影发晕现象。

② 行间转移型面阵 CCD 的结构。如图 4-17 (a) 所示，它的像敏单元（图中虚线方块）呈二维排列，每列像敏单元被遮光的读出寄存器及沟阻隔开，像敏单元与读出寄存器之间又有转移控制栅。由图可见，每一像敏单元对应于二个遮光的读出寄存器单元（图中斜线表示被遮蔽，斜线部位的方块为读出寄存器单元）。读出寄存器与像敏单元的另一侧被沟阻隔开。由于每行像敏单元均被读出寄存器所隔，因此，这种面阵 CCD 称为行间转移型 CCD。图中最下面是二相时钟脉冲 ϕ_1 、 ϕ_2 驱动的水平读出寄存器。

图 4-17 (b) 是隔行转移面阵 CCD 的二相注入势垒器件的像敏单元和寄存器单元的结构图。采用两层多晶硅，第一层提供像敏单元上的 MOS 电容器电极，又称为多晶硅光控制极；第二层基本上是连续的多晶硅，选择掺杂后得到二相转移电极系统，称为多晶硅寄存器栅极系统。转移方向用离子注入势垒造成，使电荷只能按规定的方向转移，其沟阻常用来阻止电荷向

外扩散。

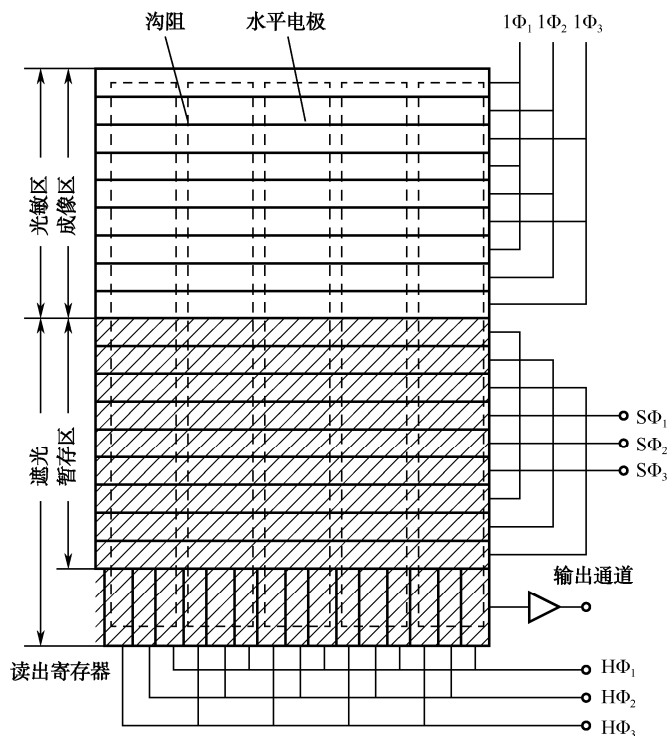


图 4-16 三相帧转移面阵 CCD 结构图

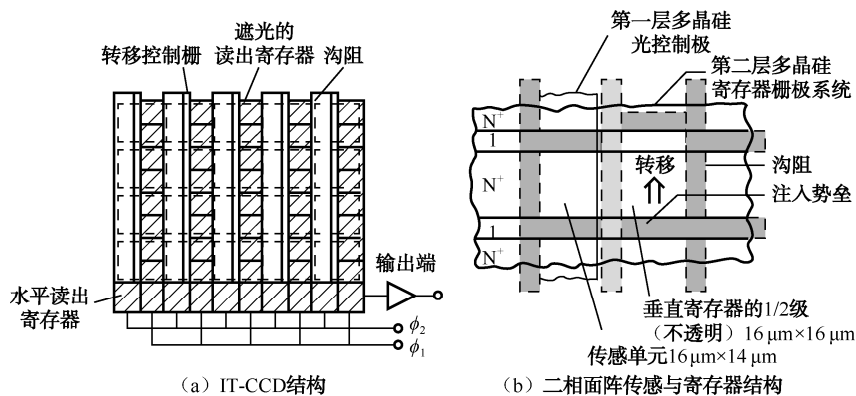


图 4-17 行间转移型面阵 CCD 结构图

这种 IT-CCD 的特点是：因为电荷转移距离比 FT-CCD 的距离短，所以工作频率高些；由于行间转移器件小些，有些受光面小些，产生的固定图案噪声小些；由于是隔行转移，可以与棋盘图案的滤色片配用，多为彩色摄像机所选用。由于 IT-CCD 总的转移次数较少，拖影效应不严重，但它只能正面光照，且结构比较复杂，工艺难度大，价格相对较高。

此外，松下公司推出了帧行间转移型面阵 FIT-CCD，它在 IT-CCD 的基础上增加了一个场存储器，以存储由垂直移位寄存器快速转移来的电荷，并且改进光屏蔽层的结构，所以使得该器件具有极好的抗拖尾性能；另外，取消了存储区，多了一个线寻址电路的线转移型面阵 CCD，



以及在 γ 辐射、X射线或微光中应用的虚相面阵 VP-CCD 等。

4.2.3 CCD 的特性参数

1. 转移效率 η 及转移损失率

(1) 转移效率 η 及转移损失率 ε 的关系。电荷转移效率是表征 CCD 性能好坏的重要参数。把一次转移后,到达下一个势阱中的电荷与原来势阱中的电荷之比称为转移效率。如 $t=0$ 时,某电极下的电荷为 $Q(0)$,在时间 t 后,转移到下一个电极下势阱中的电荷为 $Q(t)$,则转移效率 η 为

$$\eta = \frac{Q(t)}{Q(0)} \times 100\% \quad (4-7)$$

转移损失率 ε 为

$$\varepsilon = \frac{Q(0) - Q(t)}{Q(0)} = 1 - \frac{Q(t)}{Q(0)} = 1 - \eta \quad (4-8)$$

如果线阵 CCD 有 n 个栅电极,则总的转移效率 η_0 和损失率的关系式为

$$\eta_0 = \eta^n = (1 - \varepsilon)^n \approx 1 - n\varepsilon \quad (4-9)$$

或者

$$\varepsilon = (1 - \eta_0)/n \quad (4-10)$$

(2) 影响 SCCD 转移效率的主要原因:界面态对电荷的俘获;电极间隙存在势垒(电极间隙大于 $3\mu\text{m}$,转移效率明显下降);某些电荷转移不够迅速等。

(3) 提高 SCCD 转移效率的方法:采用交叠栅的电极结构,使电极间隙小到信号电荷能平滑地过渡,以克服电极间隙势垒的影响;采用“胖零”工作模式,即让“零”信号有一定的电荷填满界面态陷阱,以克服界面态对信号的俘获;采用埋沟结构(即 BCCD),以克服 SCCD 的缺陷。

2. 工作频率 f

(1) 工作频率的下限 $f_{\text{下}}$ 。CCD 是一种非稳态器件,如果驱动脉冲电压变化太慢,则在电荷存储时间内, MOS 电容已向稳态过渡,即热激发产生的少数载流子不断加入到存储的信号电荷中,会使信号受到干扰,如果热激发产生的少数载流子很快填满势阱,则注入电荷的存储和转移均成泡影,因此,驱动时钟脉冲电压必须有一个下限频率的限制。为了避免由于热产生的少数载流子对于注入信号的干扰,注入电荷从一个电极转移到下一个电极所用的转移时间 t ,必须小于少数载流子的平均寿命 τ ,即 $t < \tau$ 。在正常工作条件下,对于三相 CCD, $t = T/3 = 1/3f < \tau$,其中, T 为时钟脉冲的周期,于是可得工作频率的下限为

$$f_{\text{下}} > 1/(3\tau) \quad (4-11)$$

对二相与四相 CCD,其工作频率的下限,只需将式(4-11)中的 3 换成 2 或 4 即可。由此可见,CCD 的工作频率的下限与少数载流子的寿命 τ 有关。 τ 愈长, $f_{\text{下}}$ 愈低。

(2) 工作频率的上限 $f_{\text{上}}$ 。由于 CCD 的电极长度不是无限小,信号电荷通过电极需要一定的时间。若驱动的时钟的脉冲变化太快,在转移势阱中的电荷全部转移到接收势阱中之前,时钟脉冲电压的相位已经变化了,这就使部分剩余电荷来不及转移,引起电荷转移损失。即当工

作频率升高时,若电荷本身从一个电极转移到另一个电极所需要的转移时间 t 大于驱动脉冲使其转移的时间 $T/3$,那么,信号电荷跟不上驱动脉冲的变化,将会使转移效率大大下降。为此,若要电荷有效地转移,对三相 CCD 来说,必须使转移时间 $t \leq T/3$,即

$$f_{\uparrow} \leq 1/(3t) \quad (4-12)$$

同样,对二相与四相 CCD,只需将式(4-12)中的3换成2或4即可。

这就是电荷自身的转移时间对驱动脉冲频率上限的限制。由于电荷转移的快慢与载流子迁移率、电极长度、衬底杂质浓度和温度等因素有关,因此对于相同的结构设计,N沟 CCD 比 P沟 CCD 的工作频率高。

(3) 驱动脉冲频率 f 与损失率 ε 间的关系。三相多晶硅 N 沟道 SCCD 实测驱动脉冲频率 f 与损失率 ε 之间的关系曲线,如图 4-18 所示,由图可以看出,表面沟道 CCD 的驱动脉冲频率的上限为 10 MHz。高于 10 MHz 后,CCD 的转移损失率将急骤增加。这是因为工作频率高于 f_{\uparrow} ,信号电荷来不及转移所致。

如果信号电荷的转移时间 t 不知道,工作频率的上限 f_{\uparrow} 也可通过电荷的转移损失率 ε 得到。一般,CCD 的势阱中的电量因热扩散作用的衰减的时间常数为 $\tau_D = 10^{-8} \text{ s}$ (与所用材料和栅极结构有关)。若使 ε 不大于要求的转移损失率 ε_0 值,则对三相 CCD,有 f_{\uparrow} 为

$$f_{\uparrow} \leq \frac{1}{3\tau_D \ln \varepsilon_0} \quad (4-13)$$

对于二相与四相 CCD,只需将式(4-13)中的3换成2或4即可。

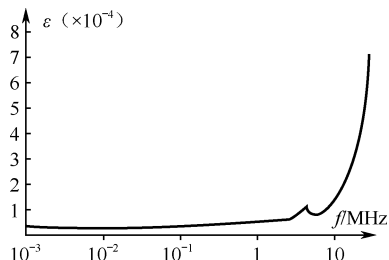


图 4-18 脉冲频率 f 与损失率 ε 间关系

3. 光电转换特性

在 CCD 中,信号电荷是由入射光子被硅衬底吸收产生的少数载流子形成的,一般它具有良好的光电转换特性。通常,CCD 的光电转换因子 γ 可达到 99.7%,即 $\gamma \approx 1$ 。

一般地,CCD 是低照度器件,它的低照度线性非常好。当输入光照度大于 100 lx 以后,CCD 的输出电压便会逐渐趋向饱和。

4. 光谱特性

用半导体硅 (Si) 作衬底的 CCD,其光谱响应曲线在背面光照时与硅光电二极管一样,其光谱响应范围为 $0.4 \sim 1.11 \mu\text{m}$ (如图 4-19 所示),响应的峰值波长也基本为 $0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 。背面光照能得到高而均匀的量子效率,是因为器件背面没有复杂的电极结构。短波长处的响应减小是由于体内和背部表面复合造成的;长波长处的减少则是红外透过减薄的衬底引起不完全吸收之故。

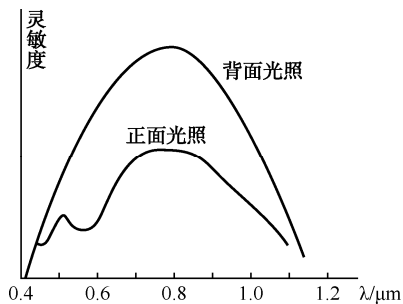


图 4-19 CCD 的光谱响应

背照器件主要困难是衬底必须减薄到小于一个分辨单元的尺寸,通常要求小于 $30 \mu\text{m}$ 左右。这是因为绝大部分可见光在硅片表面下 $4 \mu\text{m}$ 处已被吸收,少数光生载流子必须扩散到衬底正面的势阱位置。为了不使载流子因横向扩散而损失空间分辨率,器件就



必须减薄。通常衬底减薄只在光敏区进行,为了保持一定的机械强度,光敏区四周留有加强环,也可作为焊点区。此外,背部表面必须保持积累状态,以尽量减小载流子在表面复合;一般还附加有表面抗反射层,以减少入射光能的损失。背面光照方式虽有优越性,但又不能推广。其原因是,除上述工艺难度大外,还受到器件结构的限制,目前只有在帧转移型 CCD 摄像器件中使用。

正面光照的光谱响应曲线也如图 4-19 所示。由于 CCD 的正面布置有很多电极,这些电极对入射光的吸收、反射和散射作用,使得正面光照的灵敏度比背面光照时低。图中,曲线有起伏,是由于多次反射引起某些波长的光产生干涉现象所致。其中,蓝光($0.42\sim 0.45\mu\text{m}$)损失最大,黄光($0.56\sim 0.59\mu\text{m}$)次之。提高正面光照灵敏度的措施有:

(1) 用透明导电金属氧化物(ITO)做透光栅极材料,取代多晶硅材料。

(2) 采用高灵敏度的光导膜制成叠层结构器件,或采用特殊结构扩大开口率,如虚相结构等。

(3) 用 P-N 结光敏二极管代替 MOS 电容器为像元,光敏元上面只有一层绝缘物而无电导层,同时也改善了灵敏度。

(4) 通过适当设计和控制多层薄膜厚度,可以使入射光至衬底的透射率增大。如采用多晶硅、氮化物和氧化物电极系统,要求设计的空气/水汽/多晶硅/氮化物/氧化物/硅序列的各层厚度,对 5 000 K 黑体辐射源,在 $0.5\sim 0.9\mu\text{m}$ 光谱范围内具有最佳的响应率。这种响应比一般未加特殊结构设计的器件改善了近 50%。

5. 分辨率

分辨率是成像器件与成像系统最重要的一个参数,因为它是指成像器件与成像系统对物像中明暗细节的分辨能力。这一参数一直是不懂光学与光电的人们所不清楚的,尤其与分辨力参数容易混淆。

分辨率一般有两种表示法。

(1) 极限分辨率。它是在一定的测试条件之下定义的。当以一定性质的鉴别率图案(有 100% 对比度的专门的测试卡)投射到 CCD 光敏面时,在输出端观察到的最小空间频率(即用眼睛分辨的最细黑白条纹对数),就是该器件的极限分辨率。分辨率通常用每毫米黑白条纹对数(单位为线对/mm)或每帧高电视行数(单位为 TVL)表示。摄像机指的清晰度多是用的 TVL 数。这两种极限分辨率的单位,具有确定的换算关系。

CCD 是离散采样器件,根据奈奎斯特采样定理,一个摄像器件能够分辨的最高空间频率等于它的空间采样频率的一半,这个频率称为奈奎斯特极限频率。如果某一方向上的像元间距为 a ,则该方向上的空间采样频率为 $1/a$ (线对/mm),它可以分辨的最大空间频率为

$$f_{\max}=1/(2a) \text{ (线对/mm)} \quad (4-14)$$

设线阵 CCD 像敏器光敏区的总长度为 L ,用 L 乘式(4-14)两端,可以得到 CCD 像敏器的最大分辨率为

$$f_{\max}\cdot L=L/(2a)=N/2 \quad (4-15)$$

式中, N 为 CCD 像敏器的位数。对 2 048 位线阵 CCD 像敏器,其 $N=2\,048$,故得 $f_{\max}\cdot L=1\,024$,即 2 048 位线阵 CCD,最多可分辨 1 024 对线。

实际上,CCD 用极限 TVL 来表示更简单,即在某一方向的像元素就是极限 TVL 数。显然,TVL 数的一半与 CCD 光敏面的高度尺寸的比值,就是相对应的每毫米线对数(线对/mm),

所以 CCD 的像素越高, 其分辨率也越高。

上述极限分辨率的表示方法, 虽然有专门的测试卡测量, 而使用方便, 但不客观科学, 其原因如下。

① 每个人的视觉不一样, 其观测值带有主观性。

② 测试卡的对比度与几何尺寸, 以及观测时的照度不一样, 观测的结果也会有不同。如当被摄图像对比度低于 30% 时, 所观测的分辨率值就会明显下降。

③ 观测的分辨率值是系统的总体特性, 而不能分摊到各个部件上。

为此, 目前国际上一般均采用调制传递函数 (MTF) 来表示分辨率。

(2) 调制传递函数 (MTF)。所谓调制传递函数, 是指输出调制度 M_{out} 与输入调制度 M_{in} 之比, 即

$$MTF = M_{out} / M_{in} \times 100\% \quad (4-16)$$

或者说, 调制传递函数是调制度与空间频率的关系, 如图 4-20 所示。当输入正弦光波 (即一个确定的空间频率的物像投射在 CCD 上) 时, 如图 4-20 (a) 所示, CCD 的输出也将是随时间变化的一种正弦波, 如图 4-20 (b), 设波峰为 A , 波谷为 B , 则可得调制度 M 为

$$M = \frac{(A - B) / 2}{(A + B) / 2} = \frac{A - B}{A + B} \quad (4-17)$$

在调制恒定的条件下, 可以画出调制深度与空间频率的关系曲线, 如图 4-20 (c) 所示。通常, 用零空间频率下的值进行归一化, 得到无量纲量, 即调制传递函数 MTF。由图 4-20 (c) 可知, MTF 随空间频率的增高而减小。

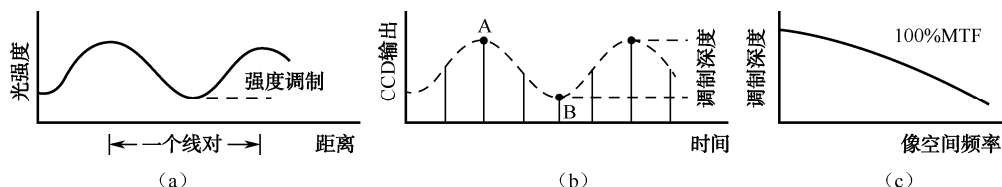


图 4-20 调制深度和空间频率

由于 MTF 表示的是转移过程前后调制度 M 的比值, 它与图像的形状、尺寸、对比度、照度等无关, 因此是客观而科学的, 而且由于 MTF 是正弦波空间频率振幅的响应, 在给定的空间频率下, 整个系统的 MTF 等于系统各部分 MTF 的乘积, 即

$$MTF_{总} = MTF_1 \times MTF_2 \times \cdots \times MTF_n \quad (4-18)$$

值得提出的是, 有时还用对比传递函数 (CTF) 来评价分辨率。所谓对比传递函数, 就是方波空间频率振幅的响应。同 MTF 一样, CTF 也随空间频率的增高而减小, 但是, CTF 不能像式 (4-18) 一样, 按各部分的乘积来评价, 不过方波的振幅响应容易测量, 所以也常采用。

6. 暗电流

在正常工作的情况下, MOS 电容不为电荷所饱和, 处于非平衡态。随着时间的推移, 由于热激发而产生的少数载流子使系统趋向平衡, 因此, 即使在没有光照或其他方式对器件进行电荷注入的情况下, 也会存在不希望有的暗电流。众所周知, 暗电流是大多数摄像器件所共有的特性, 也是判断一个摄像器件好坏的重要标准。尤其是暗电流在整个摄像区域不均匀时, 更是如此。产生暗电流的主要原因有:



- 耗尽的硅衬底中电子自价带至导带的本征跃迁;
- 少数载流子在中性体内的扩散;
- 来自 SiO_2 界面和基片之间的耗尽区;
- 由 Si-SiO_2 界面表面引起。

但在许多器件中,有许多单元每平方厘米可能有几百 nA 的局部暗电流密度,这个暗电流的来源是由于一定的体内杂质,它们产生引起暗电流的能带间复合中心。这些杂质在原始硅材料中就有,在制造器件时也可能被引入,所以,为了减小暗电流,应采用缺陷尽可能少的晶体和减少沾污。

此外,暗电流还与温度有关。温度越高,热激发产生的载流子越多,因而,暗电流就越大。据计算,温度每降低 $10\text{ }^\circ\text{C}$,暗电流可降低 $1/2$,因此,采用制冷法,暗电流可大大下降,从而可使 CCD 适用于低照度工作。

在 CCD 阵列中,局部产生大暗电流的地方,多数会出现暗电流的尖峰。对每个器件而言,产生暗电流尖峰的缺陷总是出现在相同位置的单元上。我们可利用信号处理技术,把出现电流尖峰的单元位置存储在 PROM 中,读出时只除去该单元的信号,并立刻读取相邻单元的信号值,就能消除暗电流尖峰的影响。

7. 动态范围

CCD 摄像器件的动态范围是指其输出的饱和电压与暗场下噪声峰-峰电压之比,即

$$\text{动态范围} = U_{\text{sat}} / U_{\text{Np-p}} \quad (4-19)$$

式中, U_{sat} 为输出饱和电压; $U_{\text{Np-p}}$ 为噪声的峰-峰值。

动态范围也可这样来定义和计算,即由 CCD 势阱中可存储的最大电荷量和噪声决定的电荷量之比。

(1) 势阱中的最大信号电荷量。由式(4-2)可知,CCD 势阱中可容纳的最大信号电荷量与电极面积 A 或与栅极电压 U_G 或与 MOS 电容容量 C_{ox} 成正比。此外,还与器件的结构(SCCD 或 BCCD)、时钟脉冲驱动方式(二相、三相或四相)等因素有关。如某 CCD 的电极面积为 $10 \times 20\text{ }\mu\text{m}^2$,P 型 Si 的杂质浓度 N_A 为 10^{15}cm^{-3} ,二氧化硅膜的厚度为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$,栅极电压为 10 V ,则 SCCD 势阱中的电荷最大存储量为 3.7×10^6 个电子。

若为 BCCD 结构,则存储电荷容量的计算比较复杂,随着沟道深度的增加,势阱中可容纳的电荷量减少。对于与上述 SCCD 相同条件的 BCCD,若氧化膜厚度为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$,相当于沟道深度外延层厚度为 $21\text{ }\mu\text{m}$,则 $Q_{\text{SCCD}}/Q_{\text{BCCD}}$ 约为 4.5。若为二相驱动 CCD,则实际能容纳电荷的电极面积是整个电极面积的一半。因此,在二相驱动阶梯转移电极结构的情况下,势阱中存储的电荷量要比三相交叠栅转移电极结构的 CCD 存储的电荷容量少一半。

(2) 噪声。CCD 的噪声主要由以下三方面引起。

- ① 电荷注入器件引起的噪声。将输入二极管与 CCD 放同一基片上可减小。
- ② 电荷转移过程中,电荷量的变化引起的噪声。这种噪声主要是 SCCD 背景电荷(即“胖零”)引起的散粒噪声,而 BCCD 则没有这种背景电荷的噪声。
- ③ 电荷输出产生的噪声。将输出放大器与 CCD 放同一基片上也可减小这种噪声。

因此,CCD 是一种低噪声器件,可用于微光成像。由上可知,动态范围表征了成像器件能够正常工作的照度范围,其中允许的最小照度值受器件的噪声限制,而最大照度值受势阱所能容纳的电荷量的限制。

4.2.4 CCD 在安防中的应用

1. 构成 CCD 摄像机作为视频监控系统的后端

CCD 主要用来构成 CCD 摄像机, 在安防中作为视频监控系统的后端, 如有黑白型、彩色型、超低照度型、超动态型、高清型、日夜转换型、红外夜视型、无线移动型、网络型、自动聚焦型、高速球型、十字标尺型等 CCD 摄像机。

由于有人对摄像机的组成部分都不清楚, 说 CCD 就是摄像机, 甚至有的还把指示灯之类都说成摄像机的组成部分, 因而这里有必要把一个摄像机的基本组成介绍如下。利用 CCD 组成的黑白摄像机的原理如图 4-21 所示。

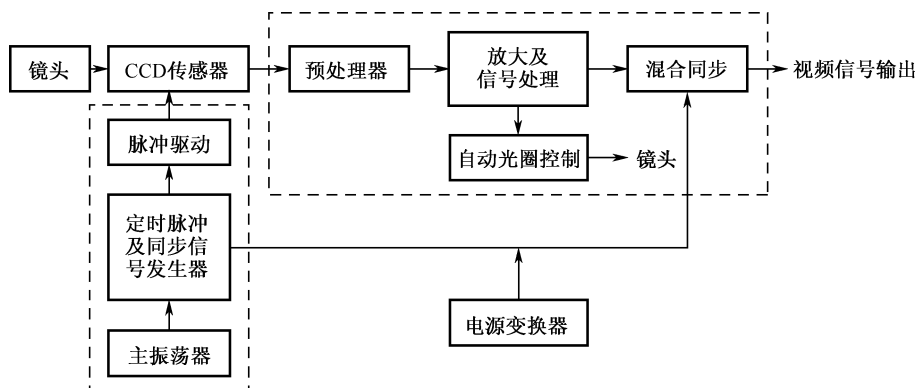


图 4-21 黑白 CCD 摄像机原理框图

由图 4-21 可看出, CCD 黑白摄像机一般由电荷耦合器件 CCD、扫描驱动及同步信号产生、视频图像处理及放大、摄像镜头、电源变换器 5 大部分组成。

含有行、场同步信息和行、场消隐信息的黑白全电视信号的波形如图 4-22 所示。其中, 图 4-22 (a) 为场正程期间的行信号波形; 图 4-22 (b) 为场逆程期间的信号波形。

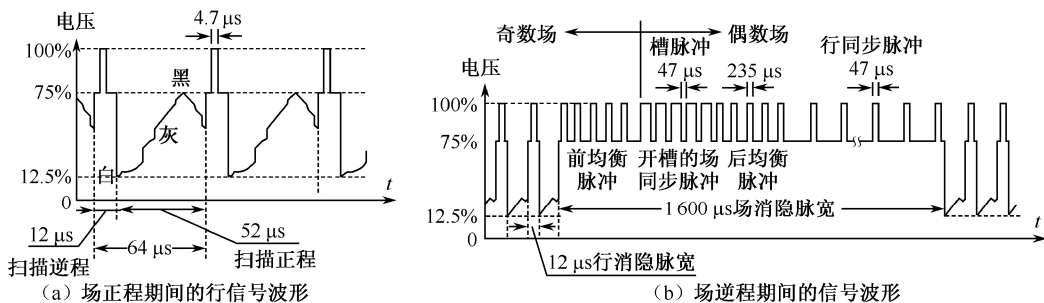


图 4-22 黑白全视频信号波形

如果是 CCD 彩色摄像机, 只要在黑白摄像机的基础上增加彩色滤波器阵列、红外截止滤光片与彩色信号的处理电路等即可组成。至于网络摄像机, 除前面所说的摄像机的基本部分外, 至少要增加能实现网络传输的功能, 即要增加视频压缩处理与视频服务器等。



CCD 的用途很广,在安防中主要用作各种各样监控摄像机(详情将在专业课中论述),还可用于图像型火灾探测(见 4.3.4 节)。此外,它还可用于图像测量与图像识别等中,下面仅介绍用作成像测距。

2. 用作成像测距仪

自 1990 年单点测距仪技术成熟后,就开始研究二维点阵列测量技术(2D 技术),即成像测距仪。这种成像测距仪在军事和生物医学领域应用得较多,它也称为成像激光雷达或三维成像。对其感兴趣的理由,起源于距离信息加入图像形态学所带来的好处。近年来,一个与其他技术并行而又独立的技术——多光谱成像技术也已经发展成熟了,它提供许多包含现场的详细信息,频率范围在可见光($\lambda=0.38\sim 0.78\ \mu\text{m}$)、近红外($\lambda=0.78\sim 2\ \mu\text{m}$)和中远红外($\lambda=2\sim 12\ \mu\text{m}$)之间。大信息量对于目标自动识别(ATR)有很大的帮助,特别是在军事和机器人的应用方面。

成像测距仪将单点测距仪技术和二维扫描装置相结合,因而它的工作原理类似于电视的扫描。在激光器的输出光路中,还设有一个光开关,当扫描光点到达一行的末端时,光开关即关闭,这时光束迅速回到下一行的开始。在扫描器内部有一对反光镜 X 和 Y,它们固定在电流调节器上。用这种方法可得到一个图像,通常有 $N=100\times 100$ 个像素,视场角为 $5^\circ\times 5^\circ$,画面的重复率为 $10\sim 30$ 帧/秒,光开关用电光调 Q 方式(KDP 或 LiNbO_3 晶体)或用声光调 Q 方式(LiNbO_3 或 CdTe),这两种开关非常快(μs 级),完全可以和电扫描系统匹配。其工作波长可以根据实际需要调节,如用激光二极管,波长可从可见光到近红外、中红外,甚至可达远红外。在远红外区,有助于降低散射衰减和扰动效应,这种仪器通常可在一般大气、雾天和阴天使用。在良好和较差的可视条件下,有几种成像激光雷达可以在几个波长下从 $1.0\ \mu\text{m}$ 到 $10\ \mu\text{m}$ 工作。

由于测量时间要分成 N 个像素,所以从理论上说,典型的成像测距仪精度要比单点测距仪差一个因子 $N^{1/2}$ 。但这对实际应用不是一个严重的障碍,与单点测距仪相比,它从一帧中得到的大量信息可以降低对分辨率和精度的要求。

近年来,正弦波调制的测距方法也被用在 3D 成像方面,使用正弦波调制技术的优点是可以使用一个图像探测器(如 CCD),并从每个像素上获取所需相位,而不用扫描整个场。例如,利用一个大角度的二极管激光束光源,其功率为 900 mW,用它照亮一个 64×25 像素的场。该光源在 20 MHz 振幅调制下工作,这时无不确定性的距离为 $L_{\text{na}}=7.5\ \text{m}$,它通过一个物镜接受场的漫反射光,每一个场的像素与一个 CCD 的像素是共轭关系。在 CCD 中,当频率在 20 MHz 时,电极是由调制波形驱动的,它控制光发生器存储和充电。电荷的收集效率与存储电极的电压有关,所以 CCD 电流输出是由光辐射和调制波形产生的,或者由位相 $\varphi=2\ \text{ks}$ 产生。这个位相的分辨率 $<10^{-3}$,这时距离的误差是几厘米。

4.3 CMOS 成像器件及其在安防中的应用

CMOS 即互补金属氧化物半导体,它开始是计算机系统内的一种重要芯片。后来有人发现,将 CMOS 与光电二极管加工一起,也可以做成一种感光的图像传感器,尤其 CMOS 有制作工艺简单,又便于大规模生产和成本低廉等特性,这大大吸引着商家,因而投资研发出来。

与 CCD 相比,CMOS 图像传感器最明显的优势是器件结构简单、集成度高、功耗小、生

产成品率高、成本低、容易与其他芯片整合。例如,可以将模/数转换、控制芯片等集成在一起,使图像数据不必在迷宫般的电路中被传来送去,因而极大地提高了捕获速度。此外,CMOS的功耗仅相当于CCD功耗的 $1/10 \sim 1/8$,可以制造出微型化、智能化成像产品,从而可开拓更多的新的应用领域。

4.3.1 CMOS 成像器件的结构及原理

1. CMOS 图像传感器的像素单元结构及原理

CMOS 图像传感器的最基本的像素单元结构,是在 MOS 场效应管的基础上加上光电二极管构成的,其最基本的像素结构如图 4-23 所示。图 4-23 (a) 为 CMOS 成像器结构的无源像素传感器 (PPS),它用两个 NMOS 场效应管构成最简单的像素,在低光照时有低的信噪比,有较低的空间噪声,高读出噪声;图 4-23 (b) 为有源像素传感器 (APS),它用三个 NMOS 场效应管构成,在低光照时有高的信噪比,有较低的时间噪声。但需要使用微透镜。目前,CMOS 摄像机大多采用图 4-23 (b) 所示的结构。

在图 4-23 (b) 中,场效应管 VT_1 是光电二极管的负载,它起开关作用,其栅极接复位信号。当有复位脉冲时, VT_1 导通,光电二极管被瞬时复位;复位脉冲消失后, VT_1 截止,光电二极管开始积分光信号。 VT_2 就是一源极跟随放大器,图 4-23 (a) 没有,它将光电二极管的输出信号进行电流放大。 VT_3 是用于选址的开关,只有当选通脉冲引入时,它才导通,从而使得被放大的光电信号输送到列总线上。因此,对 APS 的 CMOS 成像阵列来说,在每一个像素位置都有一个放大器,在一个较低的带宽下,在帧频需要复位时使离散的信号电荷包转变成一个电压,因为是在较低带宽内对信号的放大,所以提高了信噪比。这是这种 CMOS 成像器件的一个优点。因此,APS 比 PPS 具有低读出噪声和高读出速率等优点,但像素单元结构复杂一些,使填充系数降低(其填充系数一般只有 20%~30%)。

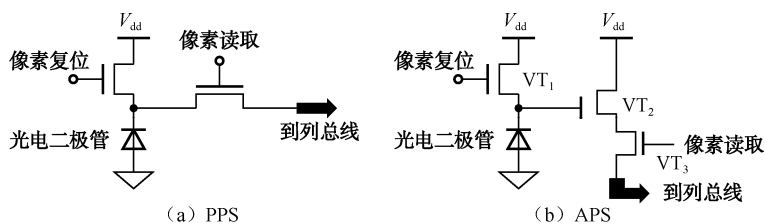


图 4-23 CMOS 图像传感器基本的像素单元结构

有源像素单元的时序图如图 4-24 所示,当复位脉冲来时, VT_1 开通,此时光电二极管复位;当复位脉冲消失后, VT_2 截止,光电二极管进行光积分;光积分结束时; VT_3 开通,此时输出光电信号。

随着大规模集成电路的进展,在每一个像素位置,还可以增加电子快门、转移阻抗放大器以及取样保持电路等,虽可能增加像素的复杂性,但附加的优点是降低了固定图像噪声。但每一像素里电路的增加又减少了光电二极管可利用的面积,目前只好在每个像素位置,配置能定向入射光电二极管的微透镜而减少照度的损失。

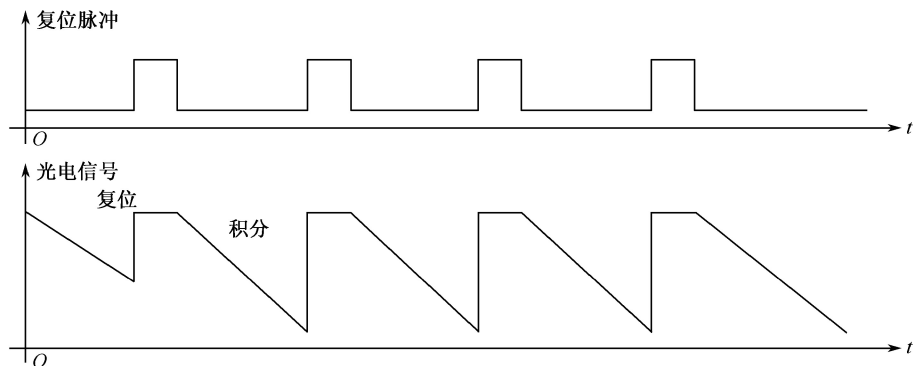


图 4-24 有源像素单元的时序图

CMOS-APS 成像器件的另一个优点是,在每一个像素位置放大的信号电压被切换到列缓冲器,然后至输出放大器的。由于信号电压直接被切换到输出放大器,在转换的过程中没有信号电荷的流失,因而也就没有图像的拖尾现象。

2. CMOS 图像传感器的总体结构及原理

典型的 CMOS 图像传感器的总体结构如图 4-25 所示,其主要组成部分是光电二极管与 MOS 场效应管和放大器组成的像敏单元的复合结构的图像传感器阵列(包含行选择、列选择及列放大器及执行相关双采样 CDS 功能等)、模拟信号处理电路、视频定时控制电路、曝光与白平衡等控制电路、I²C 总线接口电路、A/D 转换电路及预处理电路等,这些电路均集成在同一芯片上。

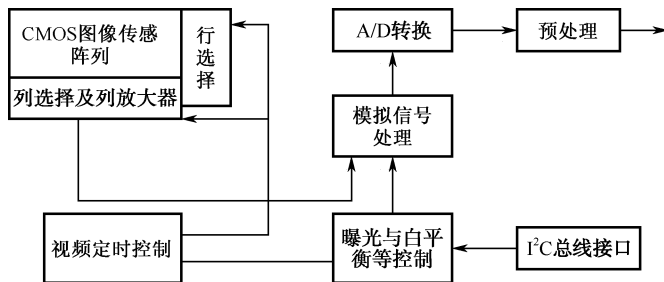


图 4-25 CMOS 图像传感器的总体结构

CMOS 图像传感器中的像敏单元阵列按 X 和 Y 方向上的地址,并分别由 X 和 Y 方向的地址译码器(一般采用移位寄存器)进行选择,即所谓的列选择与行选择。并且,每一列像敏单元都对应一个列放大器,而列放大器的输出信号分别接到由 X 方向的地址译码控制器进行选择的模拟多路开关,其输出经模拟信号处理与输出放大到 A/D 转换,最后经预处理电路后输出。

地址译码器(一般采用移位寄存器)进行选择,即所谓的列选择与行选择。并且,每一列像敏单元都对应于一个列放大器,而列放大器的输出信号分别接到由 X 方向的地址译码控制器进行选择的模拟多路开关,其输出经模拟信号处理与输出放大到 A/D 转换,最后经预处理电路后输出。

图像传感器内的视频定时控制电路提供传感器所需的各种工作脉冲,并通过总线编程(I²C 总线)对自动曝光、自动增益、白色平衡、黑电平及 γ 校正等功能进行控制处理。

3. CMOS 图像传感器的工作流程

由上述内容可知, CMOS 图像传感器芯片上集成了像敏单元阵列、行与列开关及地址译码器、同步与时序控制电路、模拟信号处理电路、A/D 转换等部分。为协调各组成部分的工作, 必须设置时序脉冲去控制各部分的运行程序。

一般, CMOS 图像传感器的工作流程如图 4-26 所示。

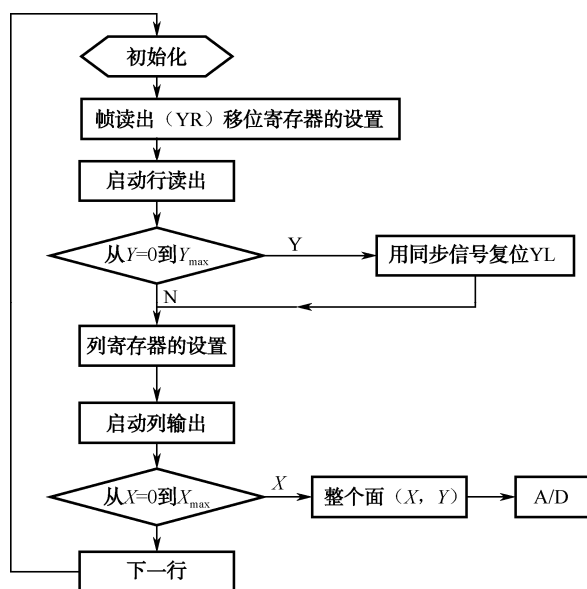


图 4-26 CMOS 图像传感器的工作流程

(1) 初始化。初始化就是要确定图像传感器的工作模式, 如设定光积分时间、放大器的增益、输出电压、取景器的大小及是否开通等。

(2) 帧读出 (YR) 移位寄存器的设置。利用同步脉冲 SYNC-YR, 可以使帧读出 (YR) 移位寄存器初始化, 即设置 (YR)。因 SYNC-YR 为行启动脉冲序列, 在它的第一行启动脉冲到来之前, 有一消隐期间, 在此期间内要发送一个帧启动脉冲。

(3) 启动行读出。SYNC-YR 指令可以启动行读出, 从 $Y=0$ 第一行开始, 直到 $Y=Y_{\max}$ 止 (实际上, 这个 Y_{\max} 等于行的像敏单元减去积分时间所占用的像敏单元)。此时, 用同步信号复位 Y 向移位寄存器 (YL), Y 向复位移位寄存器用于对各像敏单元进行复位 (各像敏单元被复位时即开始积分光信号, 这个复位至读出开始的时间间隔即为曝光时间), 以清除帧与帧之间信号的影响。

(4) 列 (X) 的移位寄存器的设置。利用同步信号 SYNC-X, 可以使 X 移位寄存器初始化。

(5) 启动列输出。SYNC-X 指令可以启动列移位寄存器读出, 从 $X=0$ 起, 至 $X=X_{\max}$ 止。X 移位寄存器存一幅图像信号。

(6) 信号采集。利用 A/D 转换器对一幅图像进行 A/D 数据采集。

(7) 启动下行读数。读完一行后, 发出指令, 接着进行下一行读数。

(8) 复位。帧复位是用同步信号 SYNC-YL 控制的, SYNC-YL 与 SYNC-YR 是分时操作的。显然, 从 SYNC-YL 开始至 SYNC-YR 出现的时间间隔也就是曝光时间。为了不引起混乱,



一般在读出信号之前应当确定曝光时间。为了消除前一个像敏单元信号的影响,还需要用脉冲信号控制对输出放大器的复位。

(9) 信号的采样/保持。为适应 A/D 转换器的工作,需要设置采样/保持脉冲,这个脉冲需由时序脉冲信号控制。

值得提出的是,为实现上述的工作流程还需要一些同步脉冲信号,这些同步脉冲信号按时序利用脉冲的前沿或后沿触发,以确保 CMOS 图像传感器按事先设定的程序工作。

4.3.2 CMOS 成像器件的特性参数

CMOS 摄像器件的特性参数同 CCD 摄像器件基本一样,也包括像素数、分辨率、最低照度、暗电流、光谱响应、动态范围、光电响应不均匀性、灵敏度等。这里只取出几种特性参数进行说明。

1. 分辨率

由 CCD 摄像器件的特性参数知,CMOS 摄像器件的分辨率,应是指 CMOS 摄像器件对景物中明暗细节的分辨能力,它通常也有两种表示方式。

(1) 极限分辨率。由前 CCD 中可知,极限分辨率可用空间频率(IP/mm,即线对/mm)来表示。因为 CMOS 成像器件也是离散采样器件,由奈奎斯特定理可知,它的极限分辨率为空间采样频率的一半。如果某一方向上的像元间距为 a ,则该方向上的空间采样频率为 $1/a$ (单位为 IP/mm),其极限分辨率将小于 $1/(2a)$,所以 CMOS 成像器件的行或列的有效像素数与它的行或列的尺寸,是衡量分辨率的重要的相关指标。由此可得

行或列的极限分辨率=行或列的有效像素数/2×行或列的传感器尺寸大小 (4-20)
式中,极限分辨率的单位为 IP/mm。

(2) 空间传递函数。通常可利用 CMOS 摄像器件的像素尺寸 b 和像素间隔等参数,能容易地推导出 CMOS 成像器件的理论空间传递函数,即

$$T(f)=\text{sinc}(bf) \quad (4-21)$$

式中, f 为空间频率。而 $T(f)=0$ 的空间频率称为奈奎斯特频率 f_N ,因而从上式中可求得

$$f_N=1/(2b) \quad (4-22)$$

同 CCD 一样,随着频率的增高,其空间传递函数减小。

2. 光电响应不均匀性

CMOS 摄像器件的光电响应不均匀性,简称 PRUN,其定义是,在标准的均匀照明条件下,各个像元的固定模式噪声电压 FPN 与信号电压 U_s 的比值。即

$$\text{PRUN}=\text{FPN}/U_s \times 100\% \quad (4-23)$$

实际上,固定模式噪声 FPN 是指非暂态空间噪声,其产生的原因主要是像素与彩色滤色器之间的不匹配、列放大器的波动、PGA 与 ADC 之间的不匹配等。

FPN 可以是耦合的或非耦合的,行范围耦合类 FPN 噪声,也可由较差的共模抑制造成。在实际的应用中,由于受到测量的约束,常将上面的定义等效为:在标准的均匀照明条件下,各个像元的输出电压中的最大值 U_{\max} 与最小值 U_{\min} 的差,同各个像元输出电压的平均值 U_0 的比值,即

$$\text{PRUN} = (U_{\max} - U_{\min}) / U_0 \times 100\% \quad (4-24)$$

上式也可通过像元的灰度数据值表示。因为每个像元的输出电压，直接对应于输出的灰度值，因此可将像元集合中的灰度最大数据作为灰度最大值 G_{\max} ；将像元集合中的灰度最小数据作为灰度最小值 G_{\min} ；将像元集合中的灰度数据的平均值作为平均灰度值 G_0 ，于是可得

$$\text{PRUN} = (G_{\max} - G_{\min}) / G_0 \times 100\% \quad (4-25)$$

3. 光谱响应特性与量子效率

CMOS 成像器件的光谱响应范围，是由光敏面的材料决定的，其本征硅的光谱响应范围，也同样在 400~1 100 nm 之间。

实际上，CMOS 成像器件的光谱性能和量子效率，均取决于它的像敏单元（光电二极管）。而光电二极管的光谱响应特性与器件的量子效率，受器件表面光反射、光干涉、光透过表面层的透过率的差异及光电子复合等因素的影响，一般量子效率总低于 100%。此外，由于上述影响会随波长而变，所以量子效率也是随波长的变化而变化的。例如，波长在 400 nm 处的量子效率约为 50%；波长大约在 700 nm 达到峰值时的量子效率约为 70%；而波长在 1 000 nm 处的量子效率仅为 8% 左右。

4. 填充因子

所谓填充因子，是光敏面积对全部像敏面积之比，它对器件的有效灵敏度、噪声、时间响应、模传递函数 MTF 等的影响很大。因为 CMOS 图像传感器包含有驱动、放大和处理电路，它会占据一定的表面面积，这样就会降低器件的填充因子。被动（无源）像敏感单元结构的器件具有的附加电路少一些，因而它的填充因子会大些；主动（有源）像敏感单元结构的器件具有的附加电路相对多一些，因而它的填充因子会小一些；但大面积的图像传感器结构，其光敏面积所占的比例会大些，其填充因子会大些。因此，提高填充因子，使光敏面积占据更大的表面面积，是充分利用半导体制造大光敏面图像传感器的关键。有两种提高的方法。

（1）微透镜法。如图 4-27 所示，即在 CMOS 成像器件的上方，安装有一层矩形的面阵微透镜，它可将入射到像敏单元的全部光线，都会聚到各个面积很小的光敏元件上，所以填充因子可以提高到 90%。此外，由于光敏元件的面积减小，就减小了结电容，提高了器件的响应速度；并且，降低了噪声，提高了灵敏度。这种方法很好，它已在 CCD 上得到成功的应用。

（2）特殊像敏单元结构法。如图 4-28 所示，它是一种填充效率较高的 CMOS 图像传感器的像敏单元结构。它的表面有光电二极管和其他电路，二者是相互隔离的。由图可看出，在光电二极管的 N^+ 区下面，增加了 N 区，它用于接收扩散的光电子；而在电路 N^+ 的下面，设置了一个 P^+ 静电阻挡层，以用于阻挡光电子进入其他电路中。

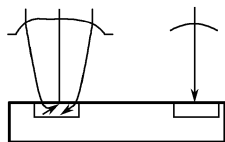


图 4-27 微透镜作用

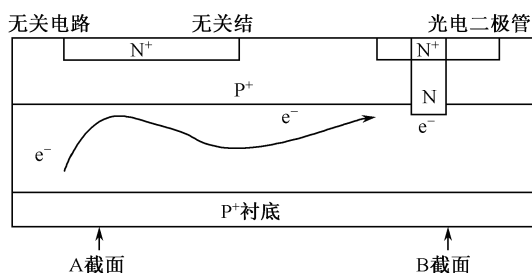


图 4-28 高填充率的 CMOS 像敏单元结构



在像敏单元结构中,表层的光电二极管,电路及其阻挡层均很薄,而且是透明的。当入射光透过后,到达外延的光敏层,所产生的光电子几乎可以全部扩散到光电二极管中。尽管光电二极管的表面积不大,但光敏表面积却像是整个像敏单元的表面积,所以等效填充因子接近于100%。实际上,填充因子不可能达到100%,其原因是:在电路层中有光陷阱,从而限制光的透过率,而对于短波长光线,影响会更大一些;表层有反射作用;存在有光电子复合现象。

这种特殊像敏单元结构法也有缺点,即存在窜音现象。因为有阻挡层,光电子也会比较容易地扩散到相邻的像敏单元中,从而使图像变得模糊。

在高填充率的像敏单元结构中,光电二极管的尺寸很小,结果提高了灵敏度,降低了噪声,并提高了器件的工作速度。

5. 输出特性

一般,CMOS 成像器件有 4 种基本输出模式(如图 4-29 所示),它们的动态范围相差很大,特性也有较大区别。

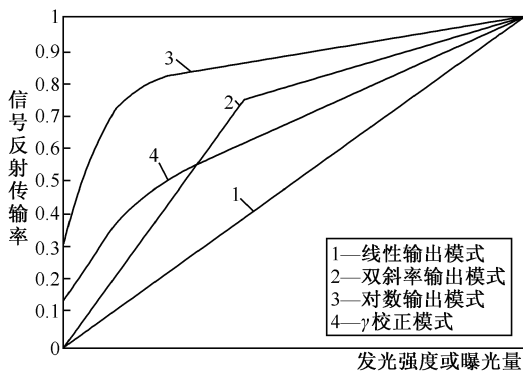


图 4-29 4 种输出模式曲线

(1) 线性输出模式。线性输出模式的输出一般与光强成正比,如图 4-29 中的曲线 1 所示。这种输出模式的动态范围最小,而且在线性范围的最高端信噪比最大。在小信号时,因噪声的影响增大,信噪比一般很低,但它适用于要求进行连续测量的场合。

(2) 双斜率输出模式。双斜率的输出模式,是一种扩大动态范围的方法,如图 4-29 中的曲线 2 所示。由图看出,它采用两种曝光时间:当信号很弱时采用长时间曝光,输出信号曲线的斜率很大;而当信号很强后,改用短时间曝光,这时曲线斜率就会降低,从而可以扩大动态范围。为了改善输出的平滑性,还可以采用多种曝光时间。这样,输出曲线是由多段直线拟合的,显然会平滑得多。

(3) 对数输出模式。对数输出模式如图 4-29 中的曲线 3 所示。它的动态范围非常大,可达到几个数量级,使得无须对照相机的曝光时间进行控制,也无须对其镜头的光圈进行调节。此外,在 CMOS 成像器件中,可以方便地设计出对数响应电路,并且实现起来也很容易。

值得说明的是,人眼对光的响应也接近对数规律,因此这种输出模式有良好的使用性能。

(4) γ 校正模式。 γ 校正模式如图 4-29 中的曲线 4 所示。它的输出规律如下式所示。

$$U = K E^\gamma \quad (4-26)$$

式中, U 为信号输出电压; E 是输入光强; K 为常数; γ 是校正因子, γ 为小于 1 的系数。可见,

这种模式也使输出信号的增长速度逐渐减缓。

由此可看出, CMOS 摄像器件的 4 种输出模式的输出特性与动态范围均有区别, 因此只能根据实际应用的需要进行选择。此外, 还可以根据实际需要两种输出模式进行组合, 如加拿大 Dalsa 公司用组合的线性-对数输出模式, 使其动态范围可最大达 120 dB。

7. 动态范围与噪声

(1) 动态范围。CMOS 成像器件的动态范围也由它的信号处理能力和噪声决定, 这也反映了 CMOS 成像器件的工作范围。其数值也是输出端的信号峰值电压与均方根噪声电压之比(通常用 dB 表示)。一般, 线性输出模式的动态范围最小, 只有 40~60 dB。为扩大这种输出模式的动态范围, 采用线性-对数输出模式, 开始时输出随图像亮度正比例增加(线性响应), 当亮度信号超过某给定阈值后, 输出成对数响应, 这样的响应模式使 CMOS 成像器件的动态范围大大提高, 其光电响应, 不仅扩大了动态范围, 还可防止图像滞后与克服图像的重影。

CMOS 成像器件的噪声, 来源于像敏单元的光电二极管、用于放大器与行列选择等开关的场效应管, 以及由它们组成像敏阵列与电路而构成图像传感器产生的工作噪声等。光敏管与场效应管的噪声, 既有相似之处也有很大的差别, 下面分别介绍。

(2) 光电二极管的噪声。即第 3 章中已论述过的热噪声、散粒噪声、产生复合噪声和 1/f 噪声四种。

(3) MOS 场效应管中的噪声。有热噪声、散粒噪声与诱生栅极噪声三种, 因为电子在导电沟道热运动形成的沟道电势分布的起伏, 会通过极电容耦合到栅极上, 从而产生栅极噪声通过漏极或源极传出去。由于该噪声是由栅极电容耦合得来的, 因而称为诱生栅极噪声。其电流均方值为

$$\bar{I}_{nh}^2 = 0.12 \times \omega^2 C_{th}^2 / g_{ms} \quad (4-27)$$

式中, C_{th} 是单位沟道宽度上的栅极沟道电容; g_{ms} 是饱和时的栅极跨导。式 (4-27) 表明, 这种噪声会随工作频率的增高而明显增大。

(4) CMOS 成像器件中的工作噪声。在工作过程中, 除上述噪声外, 还要产生一些新的噪声。例如, 复位开关工作时会带来复位噪声, 即 kTC 噪声; 而由许多个像敏单元组成 CMOS 成像器件时, 又会因为各个像敏单元的特性不一致而出现空间噪声; 此外, 还存在电磁干扰和多个时钟脉冲变化而引起的时间跳变干扰等。

① 复位噪声。当复位开关与低阻电源断开时, 信号储存在电容上的残存电荷往往是不确定的, 这就引起了一种复位噪声。这种复位噪声电荷的均方根值为

$$Q_n = (kTC)^{1/2} \quad (4-28)$$

式中, k 为玻耳兹曼常量, T 为热力学温度, C 为电路电容。当 $C=10$ pF 时, $(kTC)^{1/2}=40$ 个电子; 而当 $C=1$ pF 时, $(kTC)^{1/2}=400$ 个电子。

值得说明的是, 虽然复位噪声是随机的, 但是可用相关双采样的方法将它消除掉。

② 空间噪声。空间噪声除各个像敏单元的特性不一致引起的外, 还包括暗电流不均匀直接引起的固定图案噪声 (FPN)、暗电流的产生与复合不均匀引起的噪声、像素缺陷带来的响应不均匀引起的噪声, 以及成像器件中存在温度梯度引起的热图案噪声等。这些空间噪声是由成像器件材料的不均匀或工艺方法缺陷带来的, 有的 (如 FPN) 可以用相关双采样方法消除。

用 CMOS 成像器件作产品的设计时, 除考虑上述特性指标外, 一般还要从器件的功耗、模数转换位数 (即转换精度, 因为其位数越高, 决定了成像器件的数字化信息输出精度越高,



则成像器件的性能越好)、开发的简便性(数据可控制接口的简便性,即接口便于开发)、成本因素等方面综合考虑。

4.3.3 CMOS 成像器件与 CCD 的比较

当前,CCD 与 CMOS 两种固体摄像器件共存,但在高清摄像机中,需选用 CMOS 成像器件来制作,现将两者的比较,综合归纳如表 4-1 所示。

表 4-1 光电成像器件 CMOS 与 CCD 的比较

光电成像器件	CCD	CMOS	光电成像器件	CCD	CMOS
电信号读出方式	逐行读取	从晶体管开关阵列中直接读取	与亚微和深亚微米 VLSI 技术兼容	不能	能
驱动	二、三、四相时钟脉冲	电源电压	计算机接口	大多数无	大多数有 USB(数字式)
结构	较复杂	简单	像素缺陷率	高	低(CCD 的 1/20)
制作工艺	较特殊	标准	高清摄像	较差	好
制造成本	高	低	暗电流	小	较大
生产成品率	低	高	信噪比(S/N)	高	较低
灵敏度	高	较低	动态范围	达 66 dB	可达 120 dB
最低照度	低	较高	抗晕光及拖尾	较差	好、无拖影
帧速	低	高	与其他芯片结合	较难	容易
耐辐射	较差	好	集成度	低	高
随机存取	不能	能	电源电压	DC 12 V	DC 5 V 或 3 V
无损读取	不能	能	功耗	高	低(是 CCD 的 1/10~1/8)
芯片智能化	不能	能	尺寸	大	小

由表 4-1 可看出,CMOS 图像传感器与 CCD 相比有很多突出的特点,如体积小、功耗低、成本低、能单芯片集成系统、能随机存取、无损读取、抗光晕图像无拖尾、高帧速、高动态范围与用于高清等。因而,它有着不可抗拒的广阔的市场诱惑力和良好的发展前景。

有关 CMOS 成像器件与 CCD 的详细比较可参阅安防新技术及系统系列精品丛书之一:《安防&智能化——视频监控系统智能化实现方案》中 2.3 节与 2.4 节的详细论述,尤其值得一读的是,该书 2.4.4 节详细论述了 CMOS 成像器件在高清与智能视频监控方面优于 CCD 的 4 条原因,这里就不再论述了。

4.3.4 CMOS 成像器件在安防中的应用

由于 CMOS 成像器件有很多优于 CCD 的特点,因而其应用比 CCD 更加广泛,如美光公司曾设计“药丸式摄像机”,并成功地将一个超低功耗的微型 CMOS 图像传感器放在一个特制药丸内,病人服下此药丸后可让医生清楚地看到胃里的情况,从而更好地实现治疗。由于 CMOS

摄像机可做到纽扣般大小,因此可用于保安监视的隐形摄像或记者暗访的隐形摄像;并且,还可设计成汽车自动防撞系统和自动防出轨系统,以及司机利用动态摄像全方位观察车外的情况,从而大大提高汽车运动的安全性等。此外,可用于视频图像测量与图像识别跟踪等智能视频监控中。下面仅介绍 CMOS 成像器件在安防方面的两种应用。

1. 用于监控的摄像机

由于 CMOS 器件有非常高的输入阻抗、非常低的静态功耗,电源电压范围宽,驱动与抗干扰能力强,又便于集成,所以目前大力研发 CMOS 图像传感器及其摄像机。现市场上大都是 CMOS-APS 摄像机,它实际上是将摄像机的所有功能电路集成在一个芯片上的单芯片摄像机,如以美国 OmniVision 公司的 OV7910(彩色)和 OV7410/OV7411(黑/白) 1/3 in 的 CMOS 摄像器件为核心的单芯片 CMOS-APS 摄像机等。目前,CMOS-APS 图像传感器的分辨率已做到 $4\,096 \times 4\,096$ (1 680 万像素),随着超大规模微细加工的发展,今后还需研制 $8K \times 8K$ 像元高分辨率。此外,加拿大 Dalsa 公司的 CMOS 传感器的帧速率最高可达到 20 000 帧/秒,其采用线性-对数模式的 IM28-SA 型 CMOS 摄像机动态范围可高达 120 dB。

随着 CMOS-APS 技术及降噪技术的发展与进步,近几年又开发出来 CMOS-DPS (Digital Pixel System) 摄像机,即有数字像素系统的摄像机。这是第三代 CMOS 摄像机,它在图像传感器的每一个像素点上包含了一个 10 位 A/D 转换器,从而可将阵列上的信号退化和串扰降到最小,并允许采用更好的降噪方法。一旦数据以数字格式捕获,就可以采用各种数字信号处理技术来真实重现图像。显然,DPS 技术中的图像传感器和图像处理器是全数字式的,并采用 32 位 ARM CPU 精确控制每个像素,使每个像素独立完成采样和曝光,直接转换为数字信号,是目前市面上唯一的、真正的全数字图像处理系统。这种 CMOS-DPS 摄像机,不仅动态范围能达 120 dB,而且更便于智能化。

此外,CCD 虽然灵敏度高,但响应速度较低,不太适用于高清监控摄像机采用的高分辨率逐行扫描方式,因此高清监控摄像机普遍采用 CMOS 摄像器件。

2. 用于视频图像式防火探测器

这是一种对室外、隧道和室内高大空间的特殊需求而开发的工业等级的火灾探测器,该产品实现了“眼睛和大脑”的完美统一,能在各种复杂环境下对火情做出准确地判断,同时提供视频、网络、开关量三种报警方式,可灵活接入各类火灾报警体系中。

基于视频监控的图像型火灾探测器是一种以计算机为核心,结合光电成像技术和计算机图像处理技术的火灾自动监测处理系统。该系统是基于摄像机摄取的视频图像,对火灾进行自动探测、监视,同时将摄得的连续图像由图像采集卡转换为数字图像输入计算机,利用各种图像处理技术进行图像处理和分析,从而判断是否发生火灾。

基于视频监控的图像型火灾探测技术是视频图像火灾探测技术的典型代表,是在现有的视频监控系统上加装图像型火灾探测系统,利用视频监控得到的视频图像进行火灾探测。它具有双重功能,既能实现视频监控又能实现火灾探测,而且不需要单独加装图像采集单元,节省成本,避免重复投资。其主要结构如图 4-30 所示。

由图 4-30 可知,基于视频监控的图像型火灾探测系统由摄像机、视频采集卡、火灾图像处理单元、FAS 系统(火灾自动报警系统)及监控终端等组成。

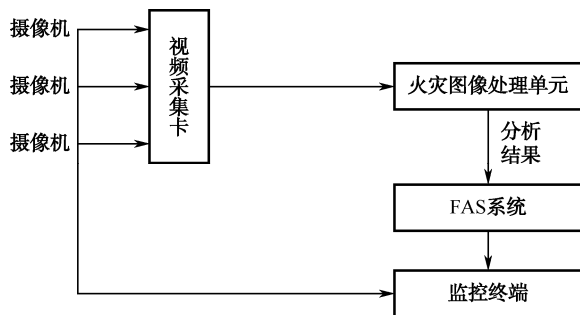


图 4-30 基于视频监控的图像型火灾探测系统

摄像机是图像处理中常用的输入设备，其关键部件是摄像器件（主要使用 CCD 与 CMOS 成像器件），其基本任务是把输入的光学图像信息转换为适宜处理和传输的视频电信号。

视频采集卡又叫做视频卡，视频采集卡可以将摄像机输出的视频信号（模拟）转换成计算机可辨别的数字数据，存储在计算机中，成为可编辑处理的视频数据文件。

火灾图像处理单元是整个探测系统的核心部分，其作用是在早期火灾阶段，对火灾所产生的烟雾和火焰等火灾图像特征进行处理、分析、识别、判定。图像处理是动态图像的连续处理，对图像上的每个目标根据一定的算法来确定它们同前一帧中目标的匹配关系，从而得到各个目标的连续变化规律，最后判断是否发生火灾。例如，利用小波变换进行图像处理，首先确定视频中的活动区域，然后利用空间模型对活动区域中的火焰颜色区域进行分割，最后利用小波变换分别从时域和空间域进行分析。时域主要分析分割区域内某一像素点颜色值中分量的变化，以此作为火焰的闪烁频率，这就成为火灾判别的第一个判据，然后在空间域分析分割区域像素值的变化，作为火灾判别的第二个判据。综合第一和第二判据就可以较准确地判断是否发生火灾。

火灾图像处理单元将分析识别出的火警消息送入 FAS 系统，启动火灾报警器，并联动其他消防设备，然后将火灾信息送至监控终端。这样，监控人员就能在第一时间获取火警信息，并可通过监控视频非常方便地对火警信息进行人工远程确认，从而可以迅速采取应对措施，消除火灾隐患、最大限度地降低火灾损失。

图像型火灾探测器具有非接触与可视化探测特点，不受空间高度、高温、易爆、有毒、高速气流等环境条件的限制，极大地提高了火灾报警的准确率和响应速度，同时有效地避免了各种环境背景因素所产生的干扰。该产品广泛应用于隧道、石油化工、煤化工、钢铁冶金、发电厂、飞机场、体育馆、会展中心等场所。

4.4 直视型光电成像器件及其在安防中的应用

上面已论述了 CCD 与 CMOS 两种应用广泛的非直视型光电成像器件，实际还有自扫描光电二极管阵列（Self-Scanned Photodiode Array, SSPA 或 SSPD）、接触式图像传感器（Contact Image Sensor, CIS）等。由于在安防中应用较少，这里就不做介绍，欲知详情，可参阅本书参考文献[1, 2, 3]。下面就介绍一下直视型光电成像器件及其在安防中的应用。

把各种不可见图像（包括红外图像、紫外图像及 X 射线图像）转换成可见图像的器件称为变像管；把强度低于视觉阈值的图像增强到可以观察程度的成像器件称为像增强管。可见，变

像管与像增强管都是图像-图像变换器件,是一种直视型光电成像器件,统称为像管。由于二者的工作原理相同,只有光阴极面的光谱响应不同,为此一并介绍。

4.4.1 像管的结构与工作原理

像管的结构如图 4-31 所示,在抽真空的玻璃外壳(现常用金属外壳)内的一个端面上涂以半透明的光电阴极,在另一端面的内侧涂以荧光粉,另外像管中安置了如图所示的阳极。

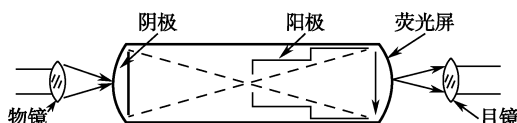


图 4-31 像管的结构

目标物所发出某波长范围的辐射通过物镜在半透明光电阴极上形成目标的像,引起光电发射。阴极面上每一点发射的电子数密度正比于该点的辐照度,这样,光阴极将光学图像转变成电子数密度图像。加有正高压的阳极形成很强的静电场,合理地安排阳极的位置和形状,让它对电子密度图像起到电子透镜的作用,使阴极发出的光电子聚焦成像在荧光屏上。荧光屏在一定速度的电子轰击下发出可见的荧光,这样,在荧光屏上便可得到目标物的可见图像。

涂在光阴极面上的光电发射材料决定了管子是变像管还是像增强管,若所涂材料对红外或紫外光线敏感,则它就是变像管。若它只对微弱的可见光敏感(如 CSb 阴极或 BioAgCs 阴极),则它就是像增强管。它们都是通过两次变换得到可见图像的,都是非扫描的光电成像器件。

此外,它们都具有图像增强的作用。实现图像增强一般有两种方法:增强电子图像密度,以及增强电子的动能,或者同时采用这两种方法。增强电子图像密度,一般利用二次电子发射来实现;而用增强电场或磁场的方法来增强电子的动能。由于图像的变换和增强的方法很多,因而产生了各种类型的变像管和像增强管。

4.4.2 主要性能参数

1. 光阴极灵敏度

光阴极性能的好坏直接对管子的工作特性有很大的影响。光阴极的量子效率决定了管子的灵敏度,量子效率对波长的依赖关系决定了管子的光谱响应。光阴极暗电流和量子效率决定了像的对比度和最大信噪比,对比度和信噪比又决定了照度最低情况下的分辨率。因此在设计和选择特殊应用的变像管时,选择恰当的光阴极是获得最佳性能所不可少的。

2. 放大率和畸变

荧光屏上像点到光轴的距离 H' 与阴极面上对应点到光轴距离 H 之比称为变像管点所在环带的放大率 β 。由于存在着畸变,阴极面上各环带的放大率数值不相等,轴上(或近轴)放大率称为理想放大率 β_0 。若放大率随离轴距离 H 的增加而增大的畸变称为枕形畸变,相反则称为桶形畸变。设给定环带的畸变为 D ,则

$$D = \beta / \beta_0 - 1 \quad (4-29)$$



若 $D>0$ ，则为枕形畸变；若 $D<0$ ，则为桶形畸变。

3. 亮度转换增益

设从光阴极发出的光电子能全部到达荧光屏，光阴极面接收的辐射通量为 Φ ，辐照度为 E_e ，在额定阳极电压 U_A 下，变像管荧光屏的光出射度 M_V ，则变像管的亮度转换增益为

$$G_L = M_V / E_e \quad (4-30)$$

设光阴极的有效接收面积为 A_K ，则光电阴极发射出的光电流为

$$I_c = S_i A_K \cdot E_e \quad (4-31)$$

若已知其光阴极的灵敏度 S_i 和荧光屏的发光效率 η ，设屏的有效发光面积为 A_V ，便可以计算出它的亮度转换增益。光电子在阳极电场的作用下，加速轰击荧光屏，若 U_A 的单位为 V， E_e 的单位为 W/m^2 ， η 取 cd/W ， S_i 的单位取为 $\mu A/W$ ，则荧光屏发出的光出射度 M_V 应为

$$M_V = 10^{-6} \eta S_i E_e U_A A_K / A_V \quad (lx) \quad (4-32)$$

代入式 (4-30) 得亮度转换增益

$$G_L = M_V / E_e = 10^{-6} \eta S_i U_A A_K / A_V \quad (4-33)$$

由式 (4-33) 可知，提高变像管亮度转换增益的方法是：提高光电阴极的灵敏度 S_i ；提高荧光屏的发光效率 η ；增大阳极电压 U_A ；减小荧光屏与光阴极工作面积之比 A_V/A_K ，而 $A_V/A_K = \beta^2$ 为变像管的横向放大率的平方，因而还应综合考虑 G_L 与 β 间的关系。

4. 观察灵敏阈

在极限观察的情况下，光电阴极面的极限照度 E 称为观察灵敏阈。它通常用实验的方法来确定，即把星点像投射到变像管光电阴极面上，测量在荧光屏上刚刚能觉察出星点像情况下阴极面上星点的照度。一般，变像管在典型工作电流 $10^{-9} A$ 、工作电压为 $15 \sim 20 kV$ 时，分辨率可超过 50 对线/mm，亮度增益为 30~90 倍。

4.4.3 像增强管的级联

单级像增强管的光放大系数和光量子增益较小，直视工作距离较短。为了提高灵敏度，增长工作距离，通常可采用串联或级联的方式。

1. 串联式像增强管

磁聚焦三级串联式像增强管结构图，如图 4-32 所示，它由三只单级像管首尾相接，共同封装在一只管壳中构成。每只单级像管的高压电源通过电阻分压器加在金属环上，使管内产生均匀加速电场。管外加长螺线线圈，用以产生轴向均匀磁场。两级中间连接处为夹心片结构，中间为透明云母片。它的前面是荧光屏，后面是光电阴极，两者的频谱特性应当正好匹配。如果每级像管的增益 $G=100$ ，则三级串联式像管的总增益可达 10^5 。实际上，由于夹心片对光的吸收以及荧光屏与光阴极的频谱有偏差，使光量子增益略低于 10^5 。

磁聚焦像增强管的优点是：管内磁场均匀，特别是光阴极附近的磁场均匀，使得它的像差较小；图像聚焦均匀，像质好。但其体积笨重，电源消耗功率大，只适用于地面固定设备上。

电聚焦三级串联像增强管结构，如图 4-33 所示。由图可见，它的加速和聚焦全由电子透镜来实现，省去了长螺线管线圈，故使质量减轻；并因省去了励磁电源，减少了功率损耗。但

是,由于中间夹心片只能做成平面形状,这对于轴对称电子透镜的宽电子束聚焦要产生像散和场曲,使图像边缘分辨率变差。

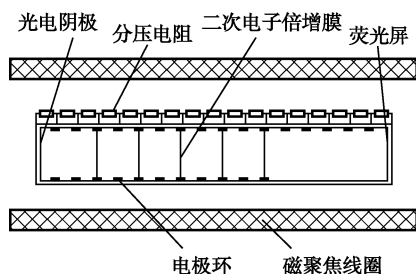


图 4-32 磁聚焦像增强管的结构图

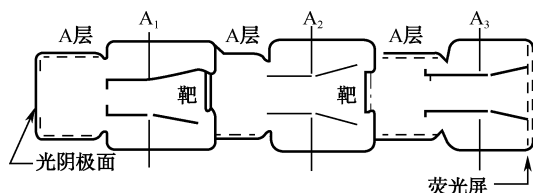


图 4-33 电聚焦三级串联像增强管的结构

2. 级联式像增强管

串联式像增强管虽然能提高管子的灵敏度,增大直视工作距离,但它存在着像差较大,图像边缘分辨率差,夹心片工艺复杂成品率低等缺点。而级联式像增强管是提高灵敏度,提高成品率的有效方法,它是将三个单级像增强管通过光学纤维玻璃板相互连接起来构成的,如图 4-34 和图 4-35 所示。

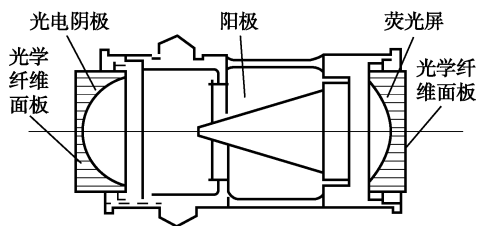


图 4-34 级联式像增强器单管示意图

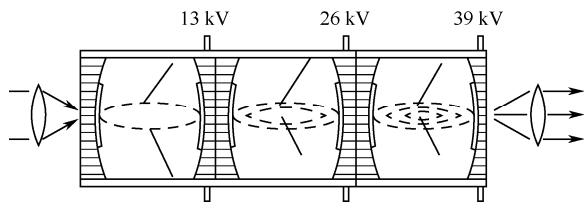


图 4-35 级联式像增强管

光纤板是由很多极细的光学纤维玻璃丝紧密排列并聚熔而成。它的一端切成平面,另一端切成(或研磨成)与阴极面或荧光屏面匹配的球面,然后用低熔点玻璃(光胶)将光纤板与玻壳粘接起来。组成光纤板的每根光纤管实际上就是导光管,它能将从一端入射的光线,经过多次全反射送到另一端。由于光导管很细(微米量级),因此分辨率高。用它做成的光纤板就能将光学图像高保真度地从一面传送到另一面,而形成光耦合。

用光纤板作级间耦合有很多优点。

(1) 各级可以做成独立单管。因此工艺较简单,使成品率大大提高,且在使用时,若某一级管子损坏了可以更换。

(2) 由于光纤板传光效率高达 80% 以上,因此用三级联像增强可获得更高的增益。

(3) 由于光纤板的端面可以加工成各种所需要的形状。例如,外表面是平面而内表面是球面,可以使像增强管的前表面是平面,以满足物镜系统成像面的要求,同时级间耦合也方便。另外,电子光学系统现在多采用同心球型静电聚焦系统,物和像都是球面,而面板的内表面加工成球面,刚好满足电子光学系统的要求。这种管子的缺点,是中心区比边缘光增益大,这是因为曲面的面板其边缘光学纤维的端面法线与管轴不再平行,而成一定角度,因此接收的光通量较中心少的缘故。



目前纤维光学耦合的级联增强管已广泛应用于夜视、微光电视等领域。现在可以获得超过 30 000 倍的增益,分辨率超过 30 对线/mm 的像增强管。

3. 微通道式像增强管

微通道式像增强管的外形呈扁圆形,如图 4-36 所示,它的一个端面为光电阴极,另一端面为荧光屏,中间是由很多具有二次电子倍增发射性能的微通道管集束而成的微通道导管。光电阴极在入射光线照射下发出光电子,它们分别沿着各个小的微通道管不断地二次电子倍增,倍增后的电子射到荧光屏上,便显示出明亮的光学图像。微通道式像增强管的关键元件是微通导管,亦称电子倍增纤维管,它是一根细玻璃管,其内壁涂具有较大二次发射系数和较大电阻率的半导体层,总电阻为 $10^9 \sim 10^{11} \Omega$ 。在通道管两端加电压 $1 \sim 3 \text{ kV}$,则在通道内壁有电流通过,使内壁电位由低到高均匀递增,在管内沿轴方向建立起均匀加速电场。当光电阴极发射出来的光电子进入微通导管后,打到通导管内壁,并且每经 $100 \sim 200 \text{ V}$ 电压加速后二次电子倍增一次,倍增后的电子再加速打到对面内壁,又产生二次倍增,如此不断倍增,使电子流急剧增加,最后射出微通导管打到荧光屏上,如图 4-37 所示。对于微弱辐射引起的光电阴极发射电流 ($10^{-11} \sim 10^{-9} \text{ A}$) 来说,一般微通导管可获得 10^8 的增益。

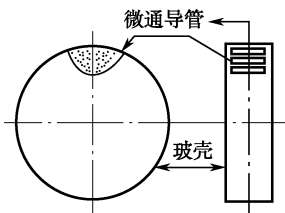


图 4-36 微通道像增强管外形结构

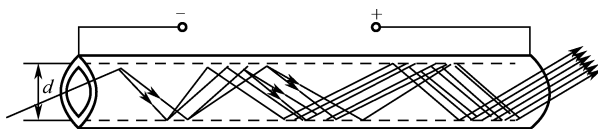


图 4-37 微通导管的二次电子倍增原理

目前,已有两种类型的微通道式像增强管:近聚焦微通道像增强管和静电聚焦微通道像增强管。近聚焦微通道像增强管的光电阴极、微通道导管与荧光屏三者尽可能地靠近,以使由光电阴极发射出的光电子能直接进入微通导管,而微通导管输出的电子亦能直接打到荧光屏上。通常,光阴极与微通板的距离不大于 0.1 mm ,其极间电压不能加的太大,一般为 $300 \sim 400 \text{ V}$ 。微通导管与荧光屏之间的电压为 $4 \sim 5 \text{ kV}$,这样可以保证电子从微通导管出来直接射到屏上,从而保证了像质。

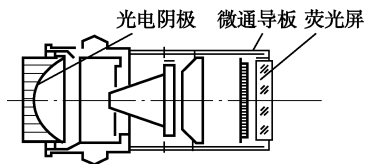


图 4-38 静电聚焦微通道像增强管

静电聚焦型的微通道像增强管的结构如图 4-38 所示,它与球对称型的像增强管很相似,光电阴极所成的光电子像,经过静电电子透镜聚焦在微通道板上,微通道板将电子像倍增后在均匀电场作用下打到荧光屏上,便可呈现出明亮的图像。这种结构的光电阴极与微通道板之间的加速电压一般为 5 kV ,微通道板的工作电压为 1.4 kV 左右,

微通道板输出面与荧光屏之间的电压为 $3 \sim 4 \text{ kV}$ 。这种类型管子的分辨率主要取决于单位面积微通道板的通道数目,以及微通道板与荧光屏的近聚焦。

总之,微通道像增强管的优点是体积小、质量轻,且可通过调整偏压来调整增益。此外,它还有自动防强光的优点,这是因为当微通道板工作在饱和状态时,输入电流的增加不会再改变输出电流,因此,可以保持荧光屏在强光下不至于被“灼伤”。但这种管子的噪声较大。一

般,静电聚焦型的微通道像增强管要比级联像增强管的调制函数好,而近聚焦型的微通道像增强管的调制函数又较级联像增强管的差。

4.4.4 直视型光电成像器件在安防中的应用

大家知道,夜视技术过去在军事上应用很广,目前在民用视频监控中也获得了广泛的应用。实际上,夜视技术是借助于光电成像器件实现夜间观察的一种光电技术,它包括微光夜视和红外夜视两类。

微光夜视技术是通过带像增强管的一种夜视技术,它实际就是对夜天光照亮的微弱目标像进行增强,以供观察的光电成像技术。而微光夜视仪,是目前国外生产量和装备量最大和用途最广的夜视器材,它又可分为直接观察(如夜视观察仪、武器瞄准具、夜间驾驶仪、夜视眼镜)和间接观察(如微光电视)两种。

红外夜视技术则分为主动红外夜视技术和被动红外夜视技术。

被动红外夜视技术是借助于目标自身发射的红外辐射来实现观察的红外技术,它根据目标与背景或目标各部分之间的温差或热辐射差来发现目标,其对应装备为热像仪,有兴趣者可参阅本人在2007年8月发表的“红外热成像技术及其在智能视频监控中的应用”一文。

主动红外夜视技术是通过主动照射并利用目标反射红外源的红外光来实施观察的一种夜视技术,其对应装备为主动红外夜视仪,实际核心就是红外摄像机。红外摄像机是由非直视型光电成像器件为核心组成的,其输出的也仅是视频信号。要观察夜间监视的场景图像,显然还应通过同轴电缆输入监视器显示出来。

4.5 特种光电成像器件及其在安防中的应用

随着军用光电等高新科学技术的发展,以及经济与民用公共安全发展的需要,特种图像传感器技术已广泛地转为民用。所谓特种图像传感器,即能采集或拾取人们视觉看不见的特殊图像,如红外、紫外、X射线等特殊频段的图像传感器。

特种光电成像器件主要是探测不可见光图像的器件,下面分别论述红外光成像器件、紫外光成像器件、X射线光成像器件,最后介绍它们在安防中的应用。

4.5.1 红外光成像器件

红外线存在于自然界的任何角落,一切温度高于0 K的物体,时时刻刻都在不停地辐射红外线。特别是活动在地面、水中和空中的军事装置,如坦克、车辆、军舰、飞机等,由于有高温部位,往往形成强的红外辐射源。因此,红外辐射的探测在军事上和民生上有广泛的应用需求。

红外光电成像器件有两种主要形式:即制冷型的光(量)子型红外光电成像器件与非制冷型的量热型红外光电成像器件。按成像方式的不同,可分为光机扫描型和凝视型两种。而红外焦平面阵列器件(Infrared-Ray Focus Plane Array, IRFPA)是一类用于凝视型热成像系统的面阵成像器件,它要求将高达 10^6 甚至更多的探测器单元紧凑地封装在焦平面上,即将二维探测



阵列器件集成在带有多路传输的读出电路的焦平面上。为实现这种设计,必须使用极小的探测器(尺寸小于 $25\text{ }\mu\text{m}$) 并使用高产量低成本的方法来制造。下面主要介绍这种阵列器件。

1. 红外焦平面阵列器件 (IRFPA) 的结构原理

红外焦平面阵列器件 IRFPA 通常工作于 $1\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 的红外波段,多用于探测常温 (300 K) 背景中的目标。普通的硅 CCD 对红外辐射(仅为近红外)的响应度很低,允许的光积分时间很短(μs 量级),不能直接用于凝视型红外成像。因此,制作 IRFPA 的途径有两个:一是选用对红外辐射灵敏度高的材料而集成为 CCD 器件;二是采用兼有普通红外探测器阵列和硅 CCD 两方面长处的结构。

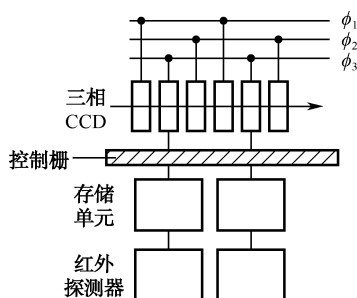


图 4-39 IRFPA 的基本结构

IRFPA 的基本结构如图 4-39 所示,图中,红外探测器可选用光电或热电探测器;电荷包的存储与转移输出机构采用普通的硅 CCD 结构。显然,IRFPA 还需有信号处理电路部分,如前置放大、滤波、A/D、延时积分、时钟及提高光敏面均匀的增益与偏置补偿器等。

根据对红外探测器阵列的信号读出和信号处理的不同安排,IRFPA 有不同的结构形式,如图 4-40 所示。

(1) 单片式结构。又称为整体式,即整个 IRFPA 做在同一块芯片上,信号处理部分通常是在探测器阵列的近旁而不是在其下面,且可以不跟探测器/读出单元制备在同一衬底上,也不需与探测器的温度相同,如图 4-40 (a) 所示。单片式结构的 IRFPA 具体又分为三种情况:一是本征型红外 CCD,它本身对红外敏感,如 HgCdTe-CCD ;二是把非本征型红外探测器与 CCD 读出电路做在同一块 Si 衬底上;三是在 Si 衬底上制作肖特基势垒二极管面阵与 CCD 读出电路,如 PtSi-CCD 。

(2) 混合式结构。这种结构的根本特点是把探测器(如用 HgCdTe 或 InSb 等本征窄带半导体制作)与信号读出部分(普通的硅 CCD)分开。混合式结构的 IRFPA 有两种形式:一是直接混合式,如图 4-40 (b) 所示,图中的探测器阵列与信号读出部分是通过钢柱把对应单元连接起来;二是间接混合式,如图 4-40 (c) 所示,其探测器阵列与信号读出部分是通过一块集成电路板相连。这种混合式结构,在选择探测器上具有很大的灵活性,可以获得 $50\%\sim 90\%$ 的高量子效率,是目前最受重视的技术之一。

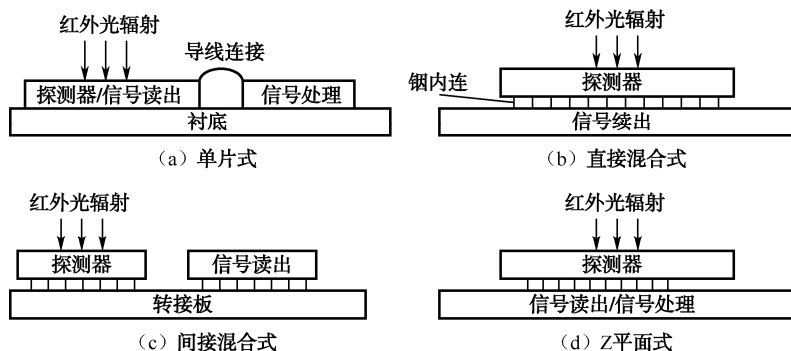


图 4-40 IRFPA 的几种不同结构

(3) Z 平面式结构。又称为立体式,如图 4-40 (d) 所示,它是将信号处理与信号读出部

分采用叠层的方法组装成模块,再把模块与红外探测器连接起来,并安装在同一块硅片上。

2. 制冷型 IRFPA

由于光(量)子型(即光电探测器类)红外光电成像器件,在使用时往往需利用制冷器,使其处于低温工作状态,以降低探测器的噪声,提高信噪比和灵敏度,因而用它们制作的 IRFPA 属于制冷型 IRFPA。这类 IRFPA 主要用于红外遥感、军事目标的探测与制导等性能要求较高的领域。目前,制冷型 IRFPA 有如下几种。

(1) 碲化铟(InSb) IRFPA。它对于 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段的红外辐射非常敏感,但它不像单晶硅有良好的 MOS 特性,因此探测器采用 InSb 光电二极管阵列,信号处理器采用 Si-CCD 构成,再用铟(In)丘将两者进行机械、电学结合,形成混合型 IRFPA。目前,有前照式 1×512 像素线阵;背照式 1024×1024 像素面阵。

(2) 碲镉汞(HgCdTe) IRFPA。目前有: 1024×1024 像素面阵,响应波段为 $1\sim 2.5\mu\text{m}$,主要用于空间成像光谱仪; 640×480 像素面阵,响应波段为 $3\sim 5\mu\text{m}$,主要用于战术导弹寻的器和战略预警监视系统;还有一种响应波段为 $8\sim 12\mu\text{m}$,主要用于常温下目标红外辐射图像的探测。它们的像元尺寸,均为 $18\mu\text{m}\times 18\mu\text{m}$ 。

(3) 硅化铂(PtSi) IRFPA。Si 肖特基势垒器件以工作于 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段的 PtSi IRFPA 的发展最快,已制成 100 万像素(1024×1024)器件,被认为是目前制作高密度 IRFPA 最先进的方法。目前,PtSi 红外阵列的制造成本低,成品率高,已得到广泛应用。

(4) GaAs/AlGaAs 多量子阱 IRFPA。调节超晶格、量子阱结构的周期和势垒高度等手段,起着碲镉汞混晶中调节组分相似的作用,能实现不同波段红外辐射的探测。据介绍,美国洛克威尔公司已制成截止波长为 $7.7\mu\text{m}$ 的 128×128 元 GaAs/CaAlAs 超晶格多量子阱探测器混合式焦平面阵列,适用于远红外探测。

3. 非制冷型 IRFPA

热电探测器阵列可工作在常温下,而不需制冷器,因而其体积小、质量轻、功耗低、使用方便,属于非制冷型 IRFPA。虽其价格低,但灵敏度要比制冷型低 1 个量级以上,在准军事和民用市场的凝视型红外成像系统中用得比较广泛。目前主要方向是降低功耗、减小探测单元尺寸、降低成本、研制 640×480 像素以上的更大的器件。这种 IRFPA 有如下几种。

(1) 多晶硅热电堆 IRFPA。应用的有 320×240 像素面阵,像元尺寸为 $28\mu\text{m}\times 28\mu\text{m}$ 。

(2) 微测辐射热计(微热敏电阻) IRFPA。混合的 VO_x 薄膜是常用的微型辐射计的热敏材料。该薄膜电阻温度系数 α 在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时为 -0.02 K^{-1} ,比大多数金属的 α 值高 $5\sim 10$ 倍,且敏感元件的 $1/f$ 噪声足够低。 Si_3N_4 是这种薄膜的很好基底,且对氧化钒是钝化剂。目前,已有 VO_2 的 336×240 像素面阵的 IRFPA。

(3) 热释电探测 IRFPA。热释电探测器做成的热成像系统,不易被干扰、容易隐蔽,并能在有烟和雾的条件下工作,可用于空中与地面侦查、入侵报警、战时观察、火情观测、医学热成像、环境污染监视等领域。在空间技术上,热释电探测器主要用来测量温度分布和湿度分布或收集地球辐射的有关数据。在科研上,包括各种辐射测量、激光测量、快速光脉冲测量、功率的定标等。

利用精确的热隔离和支撑结构的固态微机械加工技术,可将热敏感像素和与之相连的基底之间的热量损耗降到最低。将热释电探测元与电子线路集成在一块芯片上,就可成为一个固体



成像器件,如图 4-41 所示。热释电薄膜与硅 NMOS 电路的一种简单集成方法如图 4-42 所示。这里热释电像素直接与输入的耗尽型 N-MOSFET M_1 的栅极相连。晶体管 M_3 作为传输端供行寻址, M_2 作为列线负载电阻用, 复位晶体管 M_4 以清除相邻两次信号读出的残余热释电电荷。目前, 已制成有 SBN 热释电 328×245 像素面阵的 IRFPA。

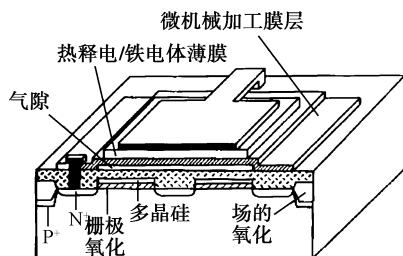


图 4-41 热释电成像器件结构

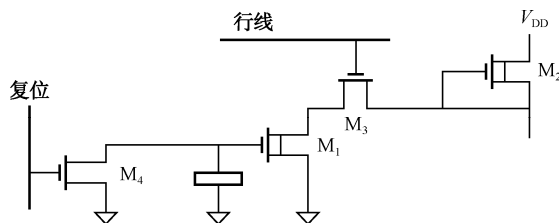


图 4-42 热释电成像器件基本信号处理电路

4. 热像仪

通过红外探测器将物体发热部位辐射的功率信号转换成电信号后, 成像装置就可以一一对应地模拟出物体表面温度的空间分布, 最后经系统处理, 形成热图像视频信号, 传至显示屏幕上, 就得到与物体表面热分布相对应的可见热像图, 即红外热图像。目前我国已能生产面积小于 $30 \mu\text{m}^2$ 的 $1\,000 \times 1\,000$ 像素的探测器阵列, 并已达到了分辨率小于 0.01°C 的温差红外热像仪。民用的热像仪主要采用非制冷焦平面阵列技术, 其系统原理方框图, 如图 4-43 所示。由图可见, 它由光学系统、光谱滤波、红外探测器阵列、输入电路、读出电路、视频图像处理、视频信号形成、视频信号形成、监视器等组成。

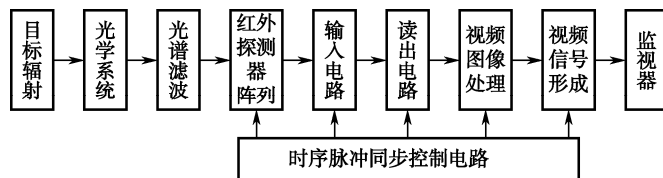


图 4-43 非制冷焦平面红外热成像系统原理方框图

由于被测目标物体各部分的红外辐射的热像分布信号非常弱, 缺少可见光图像那种层次和立体感, 因而需要进行一些图像亮度与对比度的控制、实际校正与伪彩色描绘等处理。经过处理的信号送入到视频信号形成部分进行 D/A 转换并形成标准的视频信号, 最后通过电视屏或监视器显示被测目标的红外热像图。红外热像仪能够将探测到的热量精确量化或测量, 使你不仅能够观察热图像, 还能够对发热的故障区域进行准确识别和严格分析。

红外热成像技术的优点是: 是一种被动式的非接触的检测与识别, 隐蔽性好; 不受电磁干扰, 能远距离精确跟踪热目标, 精确制导; 能真正做到 24 h 全天候监控; 探测能力强, 作用距离远; 可采用多种显示方式, 把人类的感官由五种增加到六种; 能直观地显示物体表面的温度场, 不受强光影响。

其缺点是: 图像对比度低, 分辨细节能力较差; 不能透过透明的障碍物看清目标, 如窗户玻璃; 成本高、价格贵。但肖特基势垒非制冷红外焦平面阵列的出现, 提供了一种以低成本获得高分辨力、高可靠性器件的有效手段。

4.5.2 紫外光成像器件

紫外探测技术是继红外和激光探测技术之后发展起来的军民两用光电探测技术。由于紫外光的波长比可见光短,因而它又叫作“黑光”,因为它可以引起某些材料在黑暗中发光。因此,它在公安刑侦、纸币与证件等防伪检测方面均有很好的应用;在医学、生物学等领域有着广泛的应用,如在检测诊断皮肤病时可直接看到病变细节,并可用它来检测癌细胞、微生物、血色素、白细胞、红细胞、细胞核等,其检测不但迅速、准确,而且直观、清楚;在军事上,它主要用于紫外告警、紫外通信、紫外/红外复合制导和导弹跟踪及监视天空、研究远距离星体等方面。

紫外探测技术是继红外和激光探测技术之后发展起来的军民两用光电探测技术。由于紫外光的波长比可见光短,即小于 380 nm 的光,因而它又叫作“黑光”。由于它可以引起某些材料在黑暗中发光,因而它在公安刑侦、纸币与证件等防伪检测方面均有很好的应用;在医学、生物学等领域有着广泛的应用,如在检测诊断皮肤病时可直接看到病变细节,并可用它来检测癌细胞、微生物、血色素、白细胞、红细胞、细胞核等,其检测不但迅速、准确,而且直观、清楚;在军事上,它主要用于紫外告警、紫外通信、紫外/红外复合制导和导弹跟踪及监视天空、研究远距离星体等方面。

紫外探测与成像技术是一种新颖的探测与成像技术。近几年来该技术发展很快,至今已研制出了紫外 MOS 图像传感器, GaN/AlGaIn 异质结 PIN 光电二极管阵列、SiC、GaN 紫外探测器、紫外 CCD,以及用于紫外摄像的 BTCCD 和 PtSi-SBIRF-PA 等。特别是近几年来 GaN/AlGaIn 异质结 PIN 光电二极管阵列的问世,将加速 GaN/AlGaIn 紫外摄像器件的发展速度,并终将成为紫外探测与成像技术领域的佼佼者。本文介绍紫外图像传感器的类型及目前应用较多的金属-半导体-金属(MSM)结构器件。

1. 紫外成像器件类型

(1) 紫外成像增强器。自 20 世纪 80 年代以来,是一种为导弹羽烟紫外辐射探测的一种探测器。其中,微通道(MCP)像增强器具有响应速度快、抗磁场干扰能力强、结构紧凑、体积小、质量轻、图像读出方便等优点,用于紫外探测成像,可获得高分辨率、高灵敏度。

紫外像增强器的光谱响应主要取决于光电阴极的材料。在 II-VI 族化合物中, CsTe、RbTe 和 CsRbTe 光电阴极对紫外光($160\sim 300\text{ nm}$)有很高的灵敏度,而对可见光不灵敏。在 253.7 nm 处的量子效率为 20%,显示出很好的“日盲”特性。因此,对穿过大气层到达地球表面的太阳光(波长小于 290 nm)不灵敏,具有高灵敏度、低噪声与探测微弱信号的能力,从而利用导弹羽烟的紫外辐射,能探测导弹的运动及落点。

由于紫外成像增强器是电真空器件,因而其体积、质量都比较大。

(2) 紫外固体成像器件。III-V 族化合物半导体如 GaN(氮化镓)、InN(氮化铟)、AlN(氮化铝)这三种材料的禁带宽度分别为 3.4 eV 、 1.9 eV 、 6.2 eV ,覆盖了从可见光到紫外光波段,从而使紫外探测、成像器件的制作材料的选择有了很大的空间。与成熟的 Si 相比,III-V 族化合物半导体材料普遍具有耐高温、低介电常数、耐腐蚀、抗辐射等优良特性,非常适合制作抗辐射、高频、大功率和高密度集成器件。在这些材料中,以 GaN 和 AlGaIn 尤为突出。GaN 是一种宽禁带的半导体,它十分稳定,具有强硬度、抗常规湿法腐蚀的特点,用它所制成的探测



器对能量大于 3.4 eV 的光子有很大的响应度,因而它主要用于紫外光探测与成像。显然,紫外固体成像器件具有高可靠性、高效率、快速响应、长寿命、全固体化、体积小等优点,因而在宇宙飞船、火箭羽烟探测、大气探测、飞机尾焰探测、火灾等领域内发挥重大作用。GaN 基紫外探测器的结构主要有光电导型、光伏型。光伏型结构中又分 PN 结型、PIN 型、肖特基结型、MSM 型、异质结型等。

PIN、肖特基势垒、MSM 结构可见光盲的紫外光探测器,在性能和应用上各具特点。PIN 器件受材料性能质量影响较大,对材料制备要求高,金属/半导体接触的欧姆接触质量对器件性能有重要影响,特别是对 P 型 (Al) GaN,需要沉积高功函数金属,低接触电阻的欧姆接触制备比较困难。肖特基势垒和 MSM 结构制造相对简单,以真空沉积和光刻工艺为基础的肖特基势垒和欧姆接触制备是关键,不同的表面预处理、沉积条件和退火工艺,对肖特基、欧姆特性有极大的影响,可以根据不同的应用场合及工艺实际情况,对器件结构进行合理选择。下面简介一下 MSM 紫外固体成像器件。

2. 金属-半导体-金属 (MSM) 结构器件

MSM 紫外器件的特点是制造简单和易于单片集成,其典型结构如图 4-44 所示。由图可

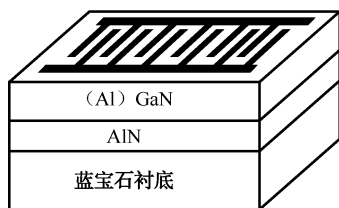


图 4-44 MSM 紫外器件结构

见,在蓝宝石衬底上用 MOCVD 生长 AlN 缓冲层、GaN 基半导体光激活层,在激活层上沉积指栅状电极并形成肖特基接触。MSM 紫外光电探测器本质上是一个背对背串联的两支金属-半导体接触二极管。当外加偏压时,一个结为正偏置,另一个结为反偏置。随着外加电压的增加,反偏置的耗尽层宽度增大,而正偏置的耗尽层宽度减小,但是其总的耗尽层宽度逐渐增加。

实践证实,CaN 与 AlGaN 的 MSM 紫外光探测器,具有很低的暗电流、可见光截止特性好、速度快、噪声低。据报道,GaN 的 MSM,在 10 V 反偏时暗电流为 57 pA;在 40 V 反偏时暗电流小于 0.35 μ A。时间响应受测量系统的 RC 时间常数限制,器件的渡越时间远低于 10 ns,在 28 V 偏压下,CaN 探测器的 NEP^* 低于 17 pW/Hz^{1/2},Al_{0.25}Ga_{0.75}N 光电二极管 NEP^* 达 24 pW/Hz^{1/2}。

4.5.3 X 射线光成像器件

X 射线是由高速带电粒子与物质原子的内层电子相互作用而发出的,其波长短、光子能量大、透过能力强。X 射线的本质与可见光、红外光、紫外光,以及宇宙射线完全相同,均属于电磁辐射,具有波粒二重性。它的波长范围在 $10^{-3} \sim 10$ nm,短波方向与 γ 射线相接,长波方向与紫外光相接,一般称波长在 0.1~10 nm 的 X 射线为软 X 射线,波长在 0.001~0.1 nm 的 X 射线为硬 X 射线。X 射线在医学透视、无损探伤、X 射线衍射、天文学、材料学等方面有着广泛的应用。

为减小 X 光对人体的危害,最有效的方法有三种。

(1) 减小 X 光照射的剂量,在低剂量 X 光的照射下,采用对穿透后的 X 光进行图像增强的办法获得比高剂量照射同样的效果。

(2) 利用图像传感器将现场图像传送到安全区进行观测, 这既可以使医务人员离开现场, 又可以通过计算机进行图像计算、处理、存储和传输。

(3) 上述两种方法的结合, 是最理想的方法。用 CCD 图像传感器的特性和 X 光像增强器, 就可以完成上述两种方法的有机结合。

X 射线频段的图像传感器技术在安检、医学透视、无损探伤、X 射线衍射、天文学、材料学等方面有着广泛的应用, 本节介绍 X 射线频段的图像传感器的类型、常用的 X 射线计算机断层扫描技术、直接数字 X 射线影像器件 (DDR 或 DR) 等。

1. X 射线成像器件的类型

X 射线探测与成像器件按 X 光的转换方式, 主要有下列四种。

(1) X 射线胶片成像技术。这是世界上最早的探测 X 射线的方法, 有很高的分辨率, 可以长期保存观察, 因而到目前一直被大量使用。但其缺点是 X 射线胶片光量子效率极低, X 射线剂量大, 需要单独的拍片室和冲洗室, 不能实时观察, 不便于存储和处理, 且属事后 (非实时) 处理, 故被后来发展起来的各种 X 射线荧光转换屏所部分替代。

(2) X 射线荧光转换屏技术。X 线荧光转换屏 (增感屏) 由输入窗基底/反光金属膜/X 线荧光粉/含铅的透光玻璃等层组成。其中的荧光粉原子受 X 射线光子激发, 产生人眼或照相版敏感的荧光, 其亮度正比于输入点 X 射线辐照强度。荧光转换屏输出光处理方式是:

① 供人眼直接观察, 如医院的大型透视仪就是这种转化屏, 但对人体有伤害, 现很少进行。

② 可供照相底板拍成照片, 现还在广泛应用。

③ 利用摄像机将其图像转换成电视 (TV) 图像供人观看, 或转化为数字图像进行保存和处理。

④ CR (Computed Radiography) 成像技术。使用激发荧光 (IP) 板来代替增感屏+胶片组合, 该荧光板经 X 射线照射后会有电子激发, 从而得到对应的 X 射线强弱影像信息, 经激光束扫描获得光信号, 再由模/数转换而成数字信息送入微机处理。

⑤ 在荧光屏上集成光电二极管阵列, 将图像转换成数字图像, 该技术属于间接数字 X 射线影像 (Indirect Digital Radiograph, IDR) 技术。

(3) X 射线影像增强器成像技术, 有两种方式。

① 利用 X 射线光电阴极, X 射线激发光电子, 然后将光电子像增强转换成可见光图像, 再通过光学系统将光学图像耦合到电视摄像机上形成可实时观看的视频信号。

② 利用 X 射线转换屏, 将转换荧光粉与可见光光电阴极做成一体, 荧光粉发出的光致使光电阴极发射光电子, 将光电子像增强成像在输出荧光屏上, 而后通过光学系统将光学图像耦合到电视摄像机上形成可实时观看的视频信号。

(4) 直接数字化成像技术。直接数字 X 线影像 (Direct Radiograph, DR) 或 DDR (Direct Digital Radiograph) 技术将 X 射线光直接转换成电子信号, 然后转换成图像。

由于光电与计算机处理技术的发展, 从根本上改变了医学影像采集、显示、存储、交换方式和手段, 从而产生了 X 射线胶片信息数字化、X 射线计算机断层扫描技术、X 射线 TV 影像、X 射线影像光电二极管阵列成像等, 使 X 射线成像技术正在进行着一场重大的变革。



2. X 射线计算机断层扫描技术

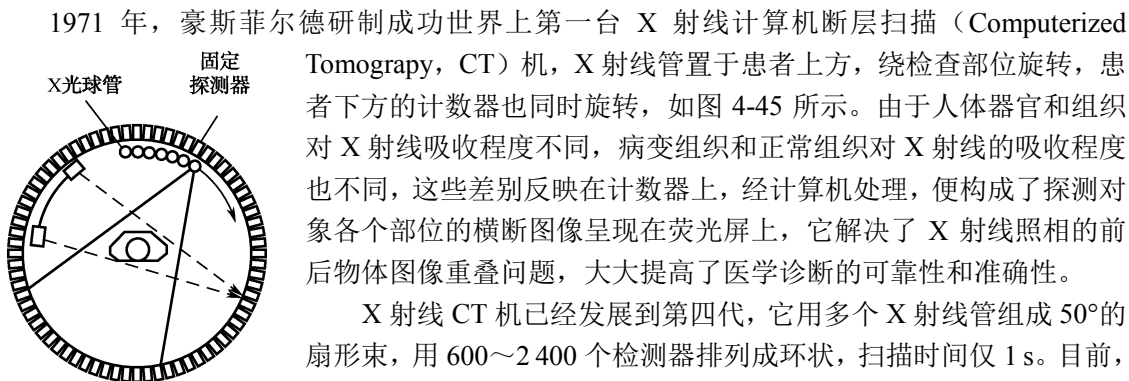


图 4-45 CT 影像读取

1971 年, 豪斯菲尔德研制成功世界上第一台 X 射线计算机断层扫描 (Computerized Tomography, CT) 机, X 射线管置于患者上方, 绕检查部位旋转, 患者下方的计数器也同时旋转, 如图 4-45 所示。由于人体器官和组织对 X 射线吸收程度不同, 病变组织和正常组织对 X 射线的吸收程度也不同, 这些差别反映在计数器上, 经计算机处理, 便构成了探测对象各个部位的横断图像呈现在荧光屏上, 它解决了 X 射线照相的前后物体图像重叠问题, 大大提高了医学诊断的可靠性和准确性。

X 射线 CT 机已经发展到第四代, 它用多个 X 射线管组成 50° 的扇形束, 用 600~2 400 个检测器排列成环状, 扫描时间仅 1 s。目前, CT 机正向第五代过渡, 只要 0.01 s 就可以捕捉到人体生理活动的动态信息。

3. 直接数字 X 射线影像器件 (DDR 或 DR)

这是新型的 X 射线成像器件, 已经成功制造出以硒为基底, 直接转换的能实现高清晰的数字透视和射线照相的平面 X 射线探测器。这种平面探测器是面积为 $23\text{ cm}\times 23\text{ cm}$ 的二维平面, 它由光电材料 (非晶态硒) 和一系列薄膜晶体管阵列 (TFT) 组成, 该薄膜晶体管上的探测元尺寸为 $150\text{ }\mu\text{m}\times 150\text{ }\mu\text{m}$ 。该探测器能以高达 30 幅图像的速率实现数字透视和射线照相, 并提供有很好的空间分辨率的数字动态像和静态像, 并确实能取代已经使用了超过 50 年的常规的 X 射线图像增强管。在即将到来的完全数字成像诊断和医学信息网络化的时代, 人们期望这种探测器能适用于不同的检查, 从一般的射线照相到肠胃、心脏及血管的检查, 都有很多临床上的优势。

利用直接转换平面探测器来获得动态图像, 是通过将穿过人体或物体的 X 射线直接转换成电信号以产生完全的数字动态和静态图像。X 射线转换单元如图 4-46 (a) 所示, 在该单元中, 非晶态的硒被用作光电材料, 将 X 射线转换成电信号。当 X 射线照射到一层非晶态硒上时, 便产生正负电荷, 其数量正比于 X 射线的照射量。接上几千伏的电压, 产生的电荷就会沿着电场方向移动, 并作为光电流被存储起来。TFT 技术被用来在一块玻璃底面上制作一个 200 万以上的探测器元阵列, 如图 4-46 (b) 所示。每个探测器元包括一个电容和一个 TFT, 当 X 射线照射到转换单元时, 产生的电荷便聚焦到电容器里。若 TFT 被一束从快速变化单元发出的处理信号激活时, 存储的电荷便作为电信号被读出到快速变化单元。该单元产生的处理信号连续激活探测器元阵列中探测元的薄膜晶体管, 由于这些处理信号而产生的电信号被放大, 并被传送到 A/D 转换器。

由于直接转换法不存在光的散射, 而间接转换方式将在 X 射线转换为光时, 光的散射会导致图像质量恶化。因此, 与间接转换方式相比, 直接转换方式的水平分辨率要高出 1.5~2 倍。与最好的间接成像方式相比, 直接成像方式剂量下降一半, 仍然能获得质量很好的图像。目前, $1\,536\times 1\,536$ 个像素的直接成像器件已研制成功, 像素间距为 $150\text{ }\mu\text{m}$, 在 $9\text{ in}\times 9\text{ in}$ 的面积中, 能够以 30 帧/s 的影像读取出来。并且, $17\text{ in}\times 17\text{ in}$ 的大尺寸 X 射线传感器已达到实用化水平, 它能够拍摄胸部和大腿部位等大面积的 X 线图像, 不仅是医疗设备, 而且可将其用于半导体的无损检查和食品的防异物设备等领域。

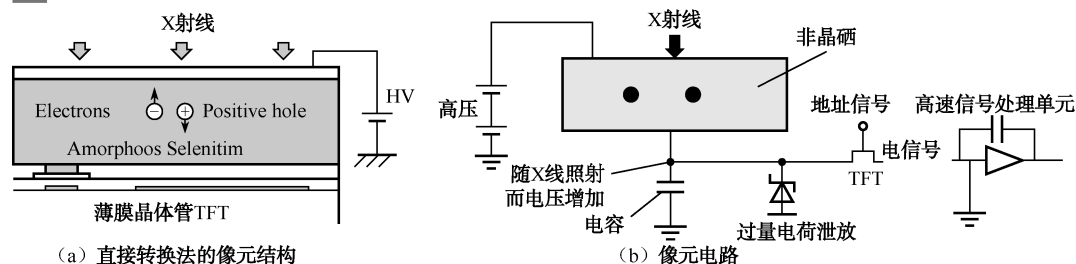


图 4-46 直接 X 射线成像的像元结构及像元电路

基于 DR 直接数字成像系统产生的图像质量，完全可与胶片照相媲美，在大多数领域可以代替胶片照相。就像数码相机代替普通相机一样，这种技术将引起 X 射线检测技术的一次革命，从而可实现 X 射线图像检测的高质量、高效率、低成本。直接 X 射线数字成像系统的体积与质量小，图像质量好，应用范围也较宽。

4.5.4 特种光电成像器件在安防中的应用

1. 红外光成像器件在安防中的应用

红外光成像器件即红外光电成像器件，它主要是探测采集红外频段的图像传感器。我们在安防视频监控系统中的摄像机，实际就是以半导体硅 (Si) 的光敏二极管面阵列构成的 CCD 或 CMOS 图像传感器为核心组成的摄像装置。而半导体硅 (Si) 感应的光谱范围是 $400\sim 1\,100\text{ nm}$ 的范围，即这种摄像机对可见光与 $780\sim 1\,100\text{ nm}$ 的近红外光敏感，因而可做成日夜型摄像机，只不过在镜头与图像传感器间加一红外截止滤光片进行切换即可（注意：白天用它来阻断红外光进入，以排除其干扰，而形成好的彩色图像；夜晚将红外截止滤光片切换开，使红外光进入，只形成黑白图像）。为增强该图像传感器探测的灵敏度，通常需加 900 nm 的发光二极管 LED 或红外半导体激光管 LD 对监视场景照明。这种红外图像传感器构成的红外摄像机，各种文章介绍得很多，本节这里只介绍特殊的红外图像传感器，即红外焦平面阵列器件 IRFPA 等。

就红外热成像技术在智能视频监控系统中的应用为例，即可说明红外图像传感器在公共安全中应用的重要性，并且这种应用往往是普通摄像监控与常用的带红外光灯的红外摄像机所不能完成的。其具体的应用有如下 5 点。

(1) 真正做到 24h 及恶劣气候条件下的全天候智能视频监控。普通的视频监控要想做到 24h 全天候的监控，只能用日夜转换摄像机加上红外灯。而红外热成像仪，是被动接收目标自身的红外热辐射，无论白天黑夜 24 h 均可以处于运行状态而正常工作，并随时对背景资料进行分析，一旦发现变化，可以及时发出预/报警，并可以通过其他智能设备自动对有关情况进行处理与上报。

在雨、雾等恶劣的气候条件下，由于可见光的波长短，克服障碍的能力差，因而观测效果差。而工作在 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 波长的长波红外热成像仪，其穿透雨、雾的能力较强，从而仍可以正常地观测目标，因此，在夜间以及恶劣气候条件下，采用红外热成像监控设备可以对各种目标，如人员、车辆等进行 24 h 智能监控。

(2) 对伪装及隐蔽的目标进行智能视频监控与识别。当人体和车辆隐蔽在草丛及树林中时，它的温度及红外辐射一般都远大于草木的温度及红外辐射，因此很容易被红外热成像仪自动识别出来。



此外,普通监视摄像头是无法看到发光物体表面掩盖下所隐藏的物体的,如对被埋藏的盗窃物品、尸体等就不能有效地检测识别出来。而利用红外热成像技术所研制的红外热成像仪则可以检测识别出来,因为当某处的表面被弄乱时,该表面的热轮廓也会被破坏,如翻过的土壤热辐射和压实的土壤热辐射是不同的,因此通过红外热成像仪的这种功能可以找到被埋藏的赃款赃物或被埋的尸体等。

(3) 进行火灾的智能视频监控与识别。由于红外热成像仪是反映物体表面温度而成像的设备,因此除了夜间可以作为现场监控使用外,还可以作为有效的防火报警设备。例如,在大面积的森林中,火灾往往是由不明显的隐火引发的,这是毁灭性火灾的根源。用现有的普通监视系统,很难发现这种隐性火灾苗头,然而用飞机巡逻,采用红外热成像仪,即可透过烟雾发现着火点,把火灾消灭在萌芽阶段。

在住宅小区、机场、码头、学校等人流密集的场所,通过红外热成像仪探测的红外热图像,均能迅速及时监测到火灾源头,进行预/报警,以便及时采取行动进行处理。

谷物粮仓往往会发生自燃现象,过去一般采用温度计测量其温度变化。采用红外热像仪可以准确判定这些火灾的地点和范围,从而做到早知道、早预防、早扑灭。

据保险公司的统计数据表明,在所有电气设备隐患中的 25%以上是引发火灾的主要原因,即由于插头接触不良引发的。红外热像仪还可以用来探测电气设备的不良接触,以及过热的机械部件,以免引起严重短路和火灾。对于所有可以直接看见的设备,红外热成像产品都能够确定所有连接点的热隐患。对于那些由于屏蔽而无法直接看到的部分,则可以根据其热量传导到外面的部件上的情况,来发现其热隐患。而利用红外热成像产品,可以很容易地探测到回路过载或三相负载的不平衡。例如,我国利用自制的热像仪对华北电力网内的 20 座发电厂、8 座变电站和 24 条高压线的 10 000 多个插头进行了过热检查,发现不正常发热点 500 多处,严重过热为 100 处,做到及时处理,从而未发生火灾事故。

此外,即使是在火灾过后,消防人员也能通过现场红外热成像仪的监视图像,开展对火灾现场卓有成效地搜救工作。

值得一提的是,使用红外热成像产品代替传统方法检测维修,还可以节省大量费用。如一个典型的办公大楼(250 000 平方英尺,10 层),平均维修费用为 6 500 美元。若用红外热成像产品检查,只要一天便可以完成对所有电动机控制,配电盘和开关装置的检查(并包括各种机械设备),其检查服务费为 600~800 美元,它的费用仅是传统方法费用的 1/10。

(4) 对边防、周界入侵进行远距离有效地监控与识别。大家知道,我国边境线甚长,海洋也辽阔,由于野外环境的恶劣,特别是在下雨、下雪、大雾、大风的日子,许多系统都不可能很好地担当起防范作用。如果采用人员巡逻,利用望远镜进行观察,往往由于可见光波长短,使观察效果不理想,根本不可能做到全天候,这样难免不造成漏查、误查和失查的现象。利用红外热成像仪,可以探测到不同物体的红外辐射,因而可以远距离地进行观察,尤其适用于风雨天气。如在边境地区放置红外热成像仪,就可成功地破获非法入境者案件,显然,其效率大大高于人工巡查。

目前在海边走私,常常利用“大飞”来进行,这些“大飞”无灯光、马力大、机动性强,往往容易摆脱缉私人员和边防人员的追踪。而有了红外热成像仪,就可以迅速、远距离地跟踪这些“大飞”,其距离可达数公里。即使在雷达的死角,这个系统也可以正常运行,特别是在黑夜和恶劣的天气下,均可以充分发挥其良好的特点。

此外,利用红外热成像技术可远距离地对周边入侵进行监视,不仅能够实时预/报警,而且

能够查看当时所入侵者的红外监控图像,从而做出分析,达到一般监视系统无法达到的效果。

(5) 对被遗弃的行李包裹等遗留物体进行有效地检测与识别。对于被遗弃的行李包裹等遗留物体,普通监控摄像头由于受自然光成像的局限,只能看到行李包裹的外部特征,很难观察到行李包裹内所装的物品,因而无法对其进行分析。但是,由于物体产生的热量在发出红外辐射的同时,还在物体周围形成了一定的表面温度分布场,而不同物体的发热功率也不尽相同,因而不同的物体内部所发出的热扩散和物体表面温度也是不同的。因此,利用红外热成像技术,可以轻而易举地对行李包裹的内部物品进行透视与分析。因为通过红外热成像技术所观察到的行李包裹的红外热图像,必然会呈现出其不同的表面温度特征。通过智能分析行李包裹的红外热图像的特征,即可推论出其内部物品的特征,从而就可对其进行适当地处置,如可检测分析识别出,被遗弃的行李包裹等遗留物体内部的可燃物与爆炸物等。

2. 紫外光成像器件在安防中的应用

(1) 用于导弹探测与告警。为了对付导弹的威胁,导弹入侵的探测与报警是必要的设备。目前的导弹的探测与入侵报警方式主要采用雷达工作的主动式探测报警和包括红外、激光和紫外探测告警为主的被动式报警。紫外告警探测器是通过探测导弹尾焰中的紫外线辐射来探测目标的,因为任何尾焰中都含有近紫外(NUV)和中紫外(MUV)线,这为紫外探测导弹并告警提供了可能。如美国在1998年就为美国海军的C-1305直升机和P-3S运输机研制成功世界上第一台新型的AAR-47紫外探测告警系统,它在太阳光的中紫外盲区内探测导弹尾焰的紫外辐射,从而解决了红外探测告警系统的虚告警问题。美国西屋公司在海军资助下也研制出PMAWS-2000紫外探测报警器,主要装备在各种战斗机、坦克和装甲车上。紫外探测告警系统在问世不到10年的时间内就发展了两代产品十余种型号,从而迅速成为机载导弹逼近探测告警系统的重点发展方向。

紫外探测告警系统最显著的特点是将响应波段置于太阳光的中紫外盲区,由于在这个波段内几乎没有自然光辐射,因而背景噪声非常小,从而减轻了信号处理的负担,使得紫外探测告警系统能将虚告警率控制在很低的程度。紫外探测告警是利用“太阳光谱盲区”的紫外波段探测导弹的火焰与尾焰,由于它对太阳光和普通灯光均不敏感,因而虚警率低;同时它不需要低温冷却,不扫描,探测告警器体积小、重量轻。所以,紫外探测告警以其独特的优势,在导弹逼近探测告警系统(MAWS)的发展中占有极其重要的地位。随着紫外探测与成像技术的不断完善,紫外探测告警系统将为导弹探测告警提供更有效的手段。

现在,又研发出一种铝镓氮(AlGaN)的新型探测材料,它对火箭发动机发出的、太阳射线中没有的一种窄波段紫外线波长非常敏感。这种技术将使导弹探测预警系统能够探测出从上方飞来的导弹,并使探测紫外线的导弹探测预警系统更加有效地为地面武器系统预警。

(2) 用于紫外探测制导。随着红外对抗技术的日趋成熟,红外制导导弹的功效将受到严重威胁。为了反红外对抗技术,探测制导技术正在向双色探测制导方面发展,这其中也包括红外/紫外双色探测制导方式。在受到敌方红外干扰时,仍可使用紫外探测器探测目标的紫外辐射,并把导弹导引至目标以进行攻击。据报道,美国及北约盟军的陆海军装备使用的尾刺(Stinger Post)对空导弹中就采用了这种红外/紫外双色探测制导技术。白天飞机反射的日光的紫外波段功率很强,则用紫外波段跟踪目标。夜晚紫外波段辐射功率小于红外辐射,则自动切换成红外波段跟踪目标。美国的“毒刺”导弹就采用紫外/红外复合寻的器,法国的“西北风”导弹也采用多元红外/紫外复合寻的制导方式。



(3) 用于紫外通信、监视天空、研究远距离星体等。紫外通信具备了许多其他常规通信方式所没有的优点,如低窃听率、高抗干扰性、低位辨率、全天候工作等。因此,紫外通信受到对通信保密性、机动性要求较高的部门的广泛重视,是一种具有极大发展潜力的新型通信方式。目前已成功地将此技术应用于空间飞行器与卫星间的秘密通信及海军战舰之间,以及战舰与舰载机的联络等方面。

此外,紫外辐射探测与紫外摄像完全可用于监视天空、研究远距离星体等方面。

(4) 用于公安刑侦、纸币与证件防伪。在刑事犯罪现场,用紫外摄像机可在非渗透性的光滑表面,如陶瓷、打蜡的地板、油漆家具表面、相片等物体表面观察到反差加强的犯罪分子遗留下的无色汗液指纹。

此外,紫外摄像机还可用来辨别纸币、证件、票据等的真假。

(5) 大面积监视输电线的隐患。用紫外摄像机可大面积监视输电线的隐患(如绝缘子的碎裂,可能会造成停电)提供了一条有效的途径,如用紫外摄像机可探测作为高压输电线和高压设备漏电征兆的电晕放电现象。但这种摄像机只能在夜间工作,因为在夜间,紫外B区域和紫外A区域的太阳辐射不会把这两个波段中微弱的电晕放电效应掩盖起来。

3. X射线光成像器件在安防中的应用

(1) 主要用于通道的安全检测。X射线图像传感器应用较广,尤其在医学领域,在公共安全领域最典型的就是用于安检机。所谓安检机,也称为安检仪、安检X光机、行李安检机、通道式X光机、物检X光机、X射线安检仪、X光行李安检机、X射线检测仪、X射线异物检测机、X光安检机、X光行包检测仪、三品检测仪、三品检查机、三品检查仪、查危仪等。

其安全检测原理是,借助于输送带将被检查行李送入X射线检查通道而完成检查的电子设备。行李进入X射线检查通道,将阻挡包裹检测传感器,检测信号被送往系统控制部分,产生X射线触发信号,触发X射线源发射X射线束。一束经过准直器的扇形X射线束穿过输送带上的被检物品,X射线被检物品吸收,最后轰击安装在通道内的双能量半导体探测器。探测器把X射线转变为信号,这些很弱的信号被放大,并送到信号处理机箱做进一步处理。

它用彩色图像显示 根据物质材质,24位真彩色显示,如有机物显示为橙色,无机物显示为蓝色,混合物显示为绿色等,并能辅助探测一些毒品炸药等危险物品。

(2) 典型的安检机。除探测大型物品的安检机外,对中小型物品的安全检查的典型的安检机如下。

① 650 mm×500 mm(简称GG-6550)多能量安检机。它采用以计算机控制和图像处理为核心的最新技术,使得分辨率更高、图像更为清晰、鲜明、更便于对被检测物品的识别。该设备的通道尺寸适中,占地面积少,适用于机场、海关、车站、港口、核电站、政府机关、邮检中心、法院、大使馆、会议场所、仓库等地对中小型物品的安全检查。

② 500 mm×300 mm(简称GG-5030)单能量安检机。它采用逐行扫描方式和智能算法,使得图像稳定清晰、分辨率高,便于对金属武器等小件物品进行检查。其设备体积小、重量轻、耗电低,自诊断功能完善,便于操作和维修,适用于机场、海关、车站、港口、核电站、政府机关、邮检中心、法院、大使馆、会议场所及等地对小件物品的安全检查。

③ 低剂量手提式X光安检机。产品具有重量轻、便于携带、射线剂量低、无须防护,无须暗室,可直接透视等优点,广泛应用于医院手足外科、显微外科、中医整骨手法复位、闭合穿针等领域;同时在运动员骨龄检测,工业产品无损检测,公安、海关行包,动物医院检查等。

光纤传感技术及其在 安防中的应用

众所周知，光纤通信以光为载体将信息通过光纤传输到接收终端后将信息再解调出来，而光纤传感器就是伴随着光纤及通信技术的发展而逐步形成的。

光纤传感器利用光在光纤中传播特性的变化来调制波导中的光波，使光纤中的光波参量随被测量的变化而改变，从而求得被测信号的大小。本章首先概述光纤传感技术，接着论述常用的光纤传感器技术、光纤光栅型传感器技术、多路复用和分布式光纤传感器技术，以及光纤传感技术在安防中的应用。

5.1 光纤传感技术概述

本节将简述光纤的结构与类型及其传光原理、光纤传感器的结构与类型、光纤传感技术的特点及调制技术等，从而使读者对光纤传感技术的基本知识能有一个全面的了解。

5.1.1 光纤的结构与类型及其传光原理

1. 光纤的结构与类型

光纤（Optic Fiber）是光导纤维的简称，它能够将进入光纤一端的光线传送到光纤的另一端。光纤是一种多层介质结构的对称柱体光学纤维，它一般由纤芯、包层、涂覆层与护套层构成，如图 5-1 所示。

纤芯与包层是光纤的主体，对光波的传播起着决定性作用。纤芯多为石英玻璃，直径一般为 $5\sim 75\mu\text{m}$ ，材料主体为二氧化硅，其中掺杂其他微量元素，以提高纤芯的折射率。包层直径很小，一般为 $100\sim 200\mu\text{m}$ ，其材料主体也为二氧化硅，但折射率略低于纤芯。涂覆层的材料一般为硅酮或丙烯酸盐，主要用于隔离杂光。护套的材料一般为尼龙或其他有机材料，用于提高光纤的机械强度，保护光纤。一般，没有涂覆层和护套的光纤，则称为裸纤。

光纤的种类很多，从不同的角度出发，有不同的分类。一般，有以下四种分类。

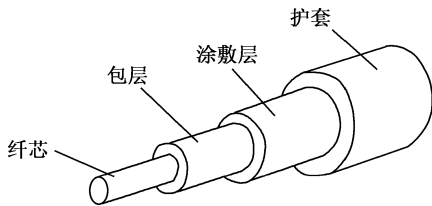


图 5-1 光纤结构示意图

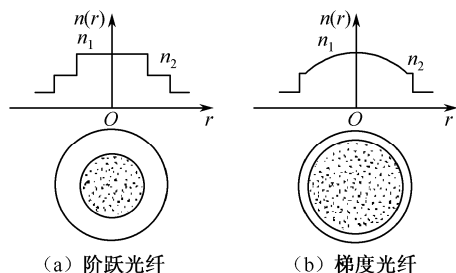


图 5-2 光纤纤芯折射率径向分布示意图

(1) 按光纤材料可分七种：石英系光纤、多组分玻璃光纤、氟化物光纤、塑料光纤、液芯光纤、晶体光纤、红外材料光纤。

(2) 按光纤横截面上折射率的分布可分二类：阶跃型（突变型）光纤、梯度型（自聚焦或渐变型）光纤。

阶跃光纤及其纤芯折射率径向分布如图 5-2 (a) 所示，在纤芯和包层两种介质内部，折射率均匀分布，即 n_1 、 n_2 均为常数，因此在纤芯与包层的分界处折射率产生阶跃变化。梯度光纤的纤芯折射率沿径向呈非

线性规律递减，故亦称渐变折射率光纤。图 5-2 (b) 为一种常见的梯度光纤及其折射率径向分布。

(3) 按传输模式多少可分二类：单模光纤与多模光纤，其示意图如图 5-3 所示。光纤中传播的模式就是光纤中存在的电磁场场形或者光场场形 (HE)。其各种场形，都是光波导中经过多次的反射和干涉的结果，而各种模式是离散的。由于驻波才能在光纤中稳定的存在，它的存在反映在光纤横截面上就是各种形状的光场，即各种光斑。

如果是一个光斑，我们称这种光纤为单模光纤 (Single Mode)，它只传输主模，也就是说光线只沿光纤的内芯进行传输。由于单模光纤完全避免了模式色散，从而使得它的传输频带很宽，因而适用于大容量、长距离的光纤通信。一般，单模光纤使用的光波长为 1310 nm 或 1550 nm。图 5-3 所示的单模光纤光线轨迹图。

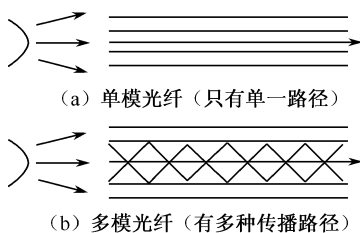


图 5-3 单模与多模光纤示意图

若为两个以上光斑，我们称它为多模光纤 (Multi Mode)，即它有多个模式在光纤中传输。由于色散或像差的关系，这种光纤的传输性能较差，频带比较窄，传输容量也比较小，所以传输距离比较短。如图 5-3 所示的多模光纤光线轨迹图。

(4) 按光纤工作波长可分三种：0.8~0.9 μm 的短波长光纤、1~1.7 μm 的长波长光纤、2 μm 以上的超长波长光纤。

由于光纤的材料与制造工艺的不同，使光在光纤中传输时会有一定的衰减，其衰减量一般用 dB/km 表示。而不同波长的光，在光纤中传播时造成的衰减是不一样的。光波长与传输损耗的关系如图 5-4 所示，由图可知，在以纳米 (nm) 表示波长的一些特定点上，其光的衰减最小。因此，光纤通信中常用的光波长，一般选用使光衰减量最小的 850 nm、1300 nm 及 1550 nm 等波长。

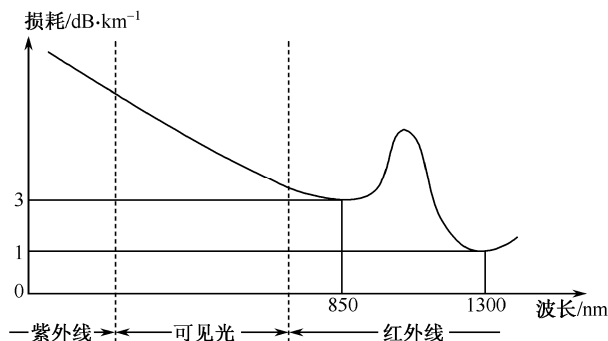


图 5-4 光波波长与传输损耗的关系

2. 光纤的传光原理

对于阶跃光纤，由于纤芯与包层的折射率均为常数，因此光在光纤内的传播途径为折线，如图 5-5 所示。

假设纤芯的折射率为 n_1 ，包层的折射率为 n_2 ，由折射定律可知，在纤芯与包层分界处，入射角 θ_1 与折射角 θ_2 存在如下关系

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

由于纤芯折射率大于包层折射率，即 $n_1 > n_2$ ，因此折射角大于入射角，即 $\theta_2 > \theta_1$ 。随着入射角 θ_1 的增大，折射角 θ_2 随之增大。当折射角 $\theta_2 = 90^\circ$ 时，折射消失，入射光线全部被反射，从而发生全反射。根据折射定律，满足全反射条件的最小入射角 θ_c 为

$$\sin \theta_c = n_2 / n_1 \quad (5-1)$$

当入射角 $\theta > \theta_c$ 时，光线不再进入包层，而是在光纤内不断反射并向前传播，直至从光纤的另一端射出，这就是光纤的传光原理。

由图 5-5 可知，光线从外界介质（如空气的折射率为 n_0 ）射入纤芯后，能够实现全反射的最大入射角 θ_0 应满足

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta' = n_1 \cos \theta_c = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (5-2)$$

式中， $n_0 \sin \theta_0$ 称为数值孔径，用 NA 表示；与之对应的最大入射角 θ_0 ，则称为张角。

数值孔径 NA 是衡量光纤集光性能的主要参数。其表征的含义在于，无论光源发射的功率多大，只有入射角处于张角 θ_0 内的光线才能被光纤接收，并在光纤内部连续发生全反射，最终传播到光纤另一端。数值孔径 NA 越大，表示光纤的集光能力越强。产品光纤通常不给出折射率，而只给出数值孔径 NA。例如，石英光纤的数值孔径为 $NA = 0.2 \sim 0.4$ ，其对应的张角为 $11.5^\circ \sim 23.6^\circ$ 。

由于光纤具有一定的柔韧性，实际工作时光纤有可能弯曲，从而使光线转弯。但是，只要仍然满足全反射条件，光线仍然能够继续前进，并到达光纤的另一端。

由上可知，光能量在光纤中传输的必要条件是 $n_1 > n_2$ 。一般，纤芯和包层的相对折射率差 $\Delta n = (n_1 - n_2) / n_1$ 的典型值为：单模光纤为 $0.3\% \sim 0.6\%$ ，多模光纤为 $1\% \sim 2\%$ 。 Δn 越大，将光能量束缚在纤芯的能力越强，但信息传输容量却越小。

5.1.2 光纤传感器的结构与类型

一般，光纤传感系统包含对外界被测信号的感知和传输两种功能。所谓感知功能，是指被测信息的变化，使得光纤中传输的光波的物理特征参量（如光强、波长、相位、频率及偏振态等）发生变化，因此可以通过测量光参量的变化，来感知外界被测信号的变化，这个过程，相当于被测信息对光纤中传播的光波，实施调制。所谓传输功能，是指将外界的被测信息调制过的光波，通过光纤传输到光电探测器进行检测，将被测信息从光波中提取出来，并进行相应的数据处理，这个过程相当于对光波进行解调。因此，光纤传感技术实际上包括调制和解调两方面的内容，并且以调制为主。

目前，光纤传感器已广泛应用于工业生产、医疗卫生、航空航天等许多领域，并可实现多

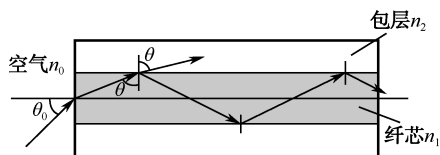


图 5-5 光在光纤内的传播



种参数的测量,如测量位移、液位、震动、压力、应变、速度、加速度、电流、电压、磁场、温度、湿度、化学物质等。

1. 光纤传感器的结构

基于光纤技术构成的传感器统称为光纤传感器。光纤传感器的一般结构如图 5-6 所示,由图可知,光纤传感器主要由光源、光纤、敏感元件、光电探测器和信号处理系统等部分组成,由光源发出的光通过传输光纤到达敏感元件(传感头),光的某一性质在此受被测量调制,已调制的光信号经光电探测器转变为电信号,最后经信号处理系统得到被测量。



图 5-6 光纤传感器的结构

2. 光纤传感器的类型

根据光纤在传感器中所起的作用,以及被测信息对光波参量的调制与光纤的关系,可以将光纤传感器大致分为功能型与非功能型两大类。

(1) 功能型光纤传感器(Functional Fiber, FF)。功能型光纤传感器(FF)是利用光纤本身的某种敏感特性或功能制成的传感器,对于功能型光纤传感器,光纤同时起到信号感知和信号传输两种作用,此时光纤既是敏感元件,又是传输元件。

这类传感器的优点是结构紧凑、灵敏度高,但是需要特殊光纤和先进的检测技术,因此成本较高。

(2) 非功能型光纤传感器(Non Functional Fiber, NFF)。非功能型光纤传感器(NFF)中的光纤仅仅起传输光的作用,也称为传光型光纤传感器。对于非功能型光纤传感器,光纤仅仅是传输元件,因此必须在光纤的一端或中间加装其他敏感元件才能构成传感器。这样,只有光照在其敏感元件上才会受被测量的调制。

这类光纤传感器无需特殊光纤及其他特殊技术,因此比较容易实现且成本较低,但灵敏度也比较低,适用于对灵敏度要求不高的场合。目前,已实用化或尚在研制的光纤传感器大都是这种非功能型的。

一般,NFF 型传感器的制作和应用比较容易,因而目前 NFF 型传感器种类较多,其应用多于 FF 型传感器。但 FF 型传感器的构思和原理往往比较巧妙,可解决一些棘手的问题,在有些领域和场合是 NFF 型传感器所不能替代的。

对于传光型光纤传感器,通常要求其所能传输的光量越多越好,因此传光型光纤传感器主要由多模光纤构成;而功能型光纤传感器,主要靠被测对象调制和改变光纤的传输特性来实现信号检测,所以功能性光纤传感器一般由单模光纤构成。

最后值得指出的是,有的还将用光纤作为探头的光纤传感器,称为拾光型光纤传感器,它接收由被测对象辐射的光或被其反射、散射的光。

5.1.3 光纤传感技术中的调制技术

1. 光纤传感技术的特点

由上述可知,基于光纤技术构成的传感器统称为光纤传感器。它与传统的传感技术相比,光纤传感技术有许多突出的优点。

(1) 由于光纤传输的是光,且光易于屏蔽,外界的干扰光很难进入光纤内部,并且,其绝缘性能好,表面耐压可达 4 kV,且不受周围电磁场的干扰,因此光纤传感具有极强的抗干扰能力。

(2) 由于光纤传感系统是基于各种光学和光电效应而工作的,因此具有灵敏度高、响应快、传输性好,且在一些特殊场合具有不可替代的作用。

(3) 由于光纤主要由各种绝缘材料构成,因而耐腐蚀,工作可靠,使用安全,适于易燃易爆场合,适于长期使用。

(4) 由于光纤体积小,直径小,一般只有几 μm 到几百 μm ,且有柔韧性,因而使用及放置方便,如可以深入机器内部或动植物体内等常规传感器不易达到的部位进行检测。

(5) 光纤传感传输频带宽,其带宽与距离之积可达 $30 \text{ MHz}\cdot\text{km}\sim 10 \text{ GHz}\cdot\text{km}$ 。

(6) 由于光纤传感器集信号敏感与信号传输于一体,因而利用它很容易构成分布式测量系统等。

由于光纤传感系统有很多突出的优点,因此发展极快,目前已广泛应用于工业生产、医疗卫生、航空航天等许多领域,并可实现如位移、液位、振动、压力、应变、速度、加速度、电流、电压、磁场、温度、湿度、化学物质等多种参数的测量。

2. 光纤传感技术中的调制技术

一般,研究光纤传感的原理,实际上就是研究光波与外界被测参量的相互作用,即光波被外界参数调制的原理。外界信号可能引起光的强度、波长(颜色)、频率、相位、偏振态等性质发生变化,从而形成不同的调制方法。根据调制手段的不同,分别有强度调制、相位调制、频率调制、偏振调制等技术的不同的工作原理。

(1) 强度调制技术。强度调制是利用被测对象的变化引起敏感元件的折射率、吸收率或反射率等参数的变化,从而导致光强度变化,最终实现测量。常用的强度调制方法有:利用光纤的微弯损耗效应,物质的吸收特性,振动膜或液晶的反射光强度的变化特性,物质因各种粒子射线或化学与机械的激励而发光的现象,以及物质的荧光辐射或光路的遮断效应等,最终可以构成压力、振动、温度、位移、气体等参量的光纤传感器和测量系统。其优点是结构简单、容易实现、成本低;缺点是受光源强度的波动和连接器损耗变化等因素的影响较大。

(2) 偏振调制技术。偏振调制就是利用光的偏振态的变化来传递被测对象的信息。常见的偏振调制有:利用光在磁场中媒质内传播的法拉第效应制成的电流、磁场传感器;利用光在电场中的压电晶体内传播的电光效应制成的电场、电压传感器;利用物质的光弹效应构成的压力、振动或声传感器;以及利用光纤的双折射率特性构成的温度、压力、振动等传感器。这类传感器可以避免光源强度变化的影响,因此灵敏度高。

(3) 频率调制技术。频率调制就是利用被测对象引起光波频率的变化来进行的检测。常见



的频率调制有：利用运动物体反射光和散射光的多普勒效应构成的速度、流速、振动、压力、加速度传感器；利用物质受强光照射时的喇曼散射效应构成的测量气体浓度传感器，或检测大气污染的气体传感器；以及利用热致发光效应的温度传感器等。

(4) 相位调制技术。相位调制是利用被测对象对敏感元件的作用，使敏感元件的折射率或传播常数发生变化，而导致光的相位变化，然后利用干涉仪来检测这种相位的变化，最终得到被测对象的信息。通常的相位调制方法有：利用光弹效应构成声、压力或振动传感器；利用磁致伸缩效应构成电流、磁场传感器；利用电致伸缩效应构成电场、电压传感器；以及利用萨格纳克效应构成旋转角速度传感器（即光纤陀螺）等。这类传感器具有很高的相位调制灵敏度，形式灵活多样，适用于不同的测试环境，可实现电磁测量、声测量、微量蒸气元素测量及压力、温度等多种物理量的测量。但需要保偏光纤才能获得好的干涉效果，因而成本高。

5.2 常用的光纤传感器技术

由于非功能型光纤传感器（NFF）的制作和应用比较容易，因而目前 NFF 型传感器应用与种类都比较多。

5.2.1 常用的光纤传感器技术

在 NFF 型传感器中，反射式强度型光纤传感器具有原理简单、设计灵活、价格低廉等特点，并已在许多物（如位移、转速、振动等）的测量中获得成功应用。而在这种光纤传感器中，又以反射式 Y 型光纤传感器为常用，下面就介绍这种光纤传感器技术的结构与工作原理。

1. Y 型光纤传感器的结构

常用的反射式 Y 型光纤传感器是最基本的、结构最简单的、使用最多的一种非功能型（NFF）或传光型光纤传感器，也有人将它称之为“天线型”光纤传感器，其结构如图 5-7（a）所示，由图可见，光纤采用 Y 型结构，即两束光纤一端合并在一起组成一个测量的光纤探头（测量时则对向被测物），另一端分为两支，分别作为光源光纤（即将发光二极管 LED 或激光二极管 LD 光源与光纤耦合连接形成光源光纤）和接收光纤（即将光电探测器件 PIN 光敏二极管或 APD 光敏二极管等与光纤耦合连接形成接收光纤），从而形成了 Y 型光纤传感器的结构。这种 Y 型结构，用两根光纤或多根光纤组成，一般实用产品大都是多根光纤组成。

2. Y 型光纤传感器的工作原理

Y 型光纤传感器的工作原理是基于光反射系数的变化。当光从光源耦合进到光源光纤，通过光源光纤传输到光纤测量头，其输出光就射向被测表面，从而会被被测表面反射到接收光纤，最后传输到由光电转换探测器件所接收。这时，光电探测器件（即图中的光敏元件）输出的电压为 $U=f(d)$ 。

显然，光电探测器件接收到的光，除与反射体到光纤探头的距离 d 有关外，还与被测表面反射体表面性质等有关。当光纤芯半径 r 、光纤的数值孔径 NA、反射面、检测器已确定的情况下，这时其输出电压 U 就只是位移 d 的函数。所以，通过分析输出电压 U ，可以得到相应位移

d 的数值, 这样就可以实现非接触微小位移的精密测量。

当光纤探头紧贴反射面时, 接收器光电探测器件接收到的光强为零。随着光纤探头离反射面距离的增加, 接收到的光强逐渐增加, 当到达最大值点后, 又随两者的距离增加而减小, 其位移和输出关系的曲线, 如图 5-7 (b) 所示。

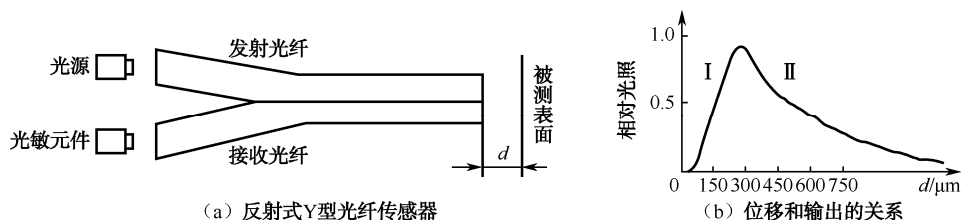


图 5-7 光纤位移传感器原理图

实际应用曲线 II 段时, 多是将光纤探头调节到离反射面距离光强最大值时予以固定, 然后进行所需的如测量位移等应用检测。

当光纤芯半径 r 、光纤的数值孔径 NA、检测器已确定的情况下, 则探测器件接收到的光与反射体表面性质、反射体到光纤探头的距离有关, 因而这种反射式 Y 型光纤传感器, 可用来检测表面粗糙度、密度, 以及位移、转速、微震等。显然, 这种反射式 Y 型光纤传感器是一种强度调制型的非接触式测量, 具有探头小、响应速度快、测量线性化等优点。

强度调制型光纤传感器是最早使用的调制方法, 其特点是, 技术简单、工作可靠、价格低, 可采用多模光纤, 且光纤的连接器和耦合器已经实现了商品化。光源可采用输出稳定的 LED 或高强度白炽灯等非相干光源。探测器一般用光敏二极管 (VD)、PIN 管和光电池等。

5.2.2 常用的光纤传感器技术的典型应用

1. 用 Y 型光纤传感器检测位移

由图 5-7 (a) 知, 当反射表面位置确定后, 接收到的反射光的光强随光纤探头到反射体的距离的变化而变化。也就是说, 传导到光敏元件上的光量, 随反射面相对光纤端面的位移 d 变化, 其位移量和输出的关系如图 5-7 (b) 所示。因此, 即可根据输出值的大小而测得位移 d 值。当 d 很小时, 由于这时两光纤的光锥角重叠部分很小, 因此反射到接收光纤的光量很少, 到达光敏元件的光强较弱; 随着 d 的不断增大, 光敏元件的接收光量随之增大并达到最大值, 这就是图中曲线 I 段。虽其范围窄, 但灵敏度高, 线性好, 适于测微小位移和表面粗糙度等, 测量范围通常在 $100 \mu\text{m}$ 以内, 有的最大接近 $300 \mu\text{m}$ 。如果 d 继续加大, 则曲线从峰值开始逐渐下降, 成为 II 段, 其特性与 I 段情况基本相反。对于这类光纤传感器, 其光强响应特性曲线是传感器设计的主要依据。

为了提高光强的耦合效率, 可采用大数值孔径光纤或传光束。目前, 这种传感器的测量位移范围最大约为 10 mm 左右 (用特性曲线 II 段), 测量分辨力可达 $0.05 \mu\text{m}$, 精度最高可达 $0.1 \mu\text{m}$ 左右 (用特性曲线 I 段)。这类传感器包括基于反射原理、遮断式、微弯损耗原理、辐射损耗原理、光弹效应等的光纤位移传感器。

在实际应用中, 这种光纤位移传感器的光纤并不是单根的发射和接收光纤, 而是由数十或



数百根光纤组成的光缆。所使用光纤束的特性是影响这种类型光纤传感器的灵敏度的主要因素之一，这些特性包括光纤的数量、尺寸和分布，以及每根光纤的数值孔径。而光纤探头端部的发射光纤和接收光纤的分布状况对探头测量范围和灵敏度的大小有较大影响。一般，在光纤探头的端部，发射光纤与接收光纤有以下四种分布组合方式（如图 5-8 所示）：随机分布（混合式）、半球形对开（或对半）分布、共轴内发射分布、共轴外发射分布。

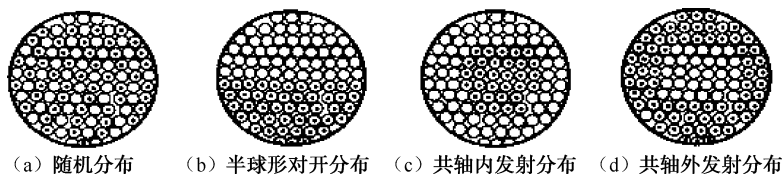


图 5-8 发射光纤和接收光纤的四种分布组合方式

在图 5-8 中，随机排列混合式的灵敏度高，而半球形对半式的 I 区段范围最大。随机排列虽可近似地达到灵敏度的最佳值，即可以获得最大位移灵敏度，但将接收光纤和发射光纤一根一根地交错排列，比较困难而麻烦。而半球形分布的探头，测量范围虽比随机分布时要大。不同的光纤分布，以及改变光纤的一两个特性参数，也会影响到测量范围。例如，每根光纤直径加粗，也有同样的效果。值得指出的是，位移范围的加大，又会伴随着灵敏度的下降。因此，需根据实际的需要，灵活地选择发射光纤和接收光纤的分布组合方式。

2. 用 Y 型光纤传感器检测表面粗糙度

(1) 表面粗糙度检测原理。根据 P.Beakmann 等人的理论，当一束光射至金属表面时，由于表面的微观不平，反射光将发生漫反射现象。其漫反射光强的表达式为

$$I = I_0 F^2 e^{-U_z R_q^2 \sin^2 C U_x L} + I_0 e^{-U_x R_q} \frac{\sqrt{\pi} F^2 T}{2L} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(U_z R_q)^m}{m! \sqrt{m}} \exp\left(-\frac{U_x^2 T^2}{4m}\right) \quad (5-3)$$

式中， $F = \frac{1}{\cos \theta_1} \left(b + \frac{a U_x}{U_z} \right)$ ； $U_z = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)$ ； $U_x = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_1 - \sin \theta_2)$ ； I_0 为入射光强；

T 为表面相关长度； θ_1 为光束入射角； θ_2 为光束散射角； λ 为光束波长； c 为常数； L 为被照亮面的长度； R_q 为高低不平表面反射率的均方根值，为与表面粗糙度相关的函数，可以作为表面粗糙度的表征值。 F 为粗糙度表面的反射函数，它与表面反射率 R 及入射光的入射角 θ 有关。并且，漫反射光强为镜面反射光强与散射光强之和。其中，镜面反射光强为

$$I_s = I_0 F^2 e^{-U_x R_q^2 \sin^2 C U_x L} \quad (5-4)$$

散射光强为

$$I_d = I_0 e^{-U_x R_q} \frac{\sqrt{\pi} F^2 T}{2L} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(U_z R_q)^m}{m! \sqrt{m}} \exp\left(-\frac{U_x^2 T^2}{4m}\right) \quad (5-5)$$

上两式中含有 R_q ，可见，通过测量 I_s 可以计算或评定表面粗糙度，这就是镜面反射法。如果能测得 I_s 和 I_d ，求其比值，同样可以计算或评定表面粗糙度，这是求比值法。由于求比值法和镜面反射法中含有 F 项或 T 项，从而带来了表面反射率和表面相关长度的影响，这是造成前述问题存在的主要原因。

从式 (5-4) 中可以看出，镜面反射光强项中不含有相关长度 T 。这样，如果单侧镜面反射光强，即可消除表面相关长度的影响。镜面反射光强项中含有 F 项，其表达式为

$$F = \frac{1}{\cos \theta_1} \left(b + \frac{aU_x}{U_z} \right)$$

$$= \frac{R[(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)^2 + (\sin \theta_1 - \sin \theta_2)^2] + (\cos^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_2) + (\sin^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_2)}{2(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)} \quad (5-6)$$

因此, F 可以看成表面反射率 R 随 θ_1 、 θ_2 变化的函数, 因此在 $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$ 的情况下, $F = R$ 。此时镜面反射光强为

$$I_s = I_0 R^2 \exp \left(-\frac{16\pi^2 R_q^2}{\lambda^2} \right) \quad (5-7)$$

根据这一条件, 表面粗糙度检测装置如图 5-9 所示。

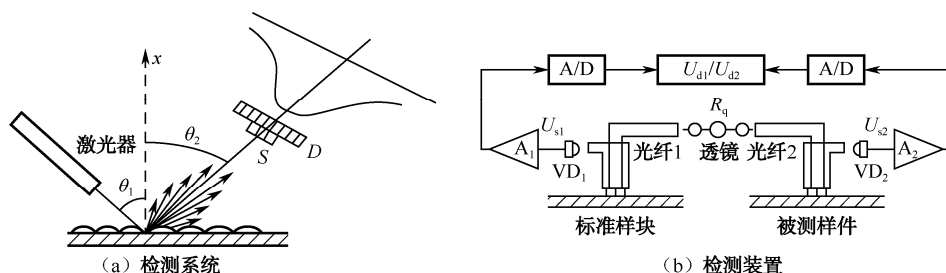


图 5-9 表面粗糙度检测装置

在图 5-9 (b) 中, 光纤 1 和光纤 2 同时以 0° 角测量表面已知的粗糙度的标准样块和表面粗糙度未知的被测样块的表面反射光强。由于标准样块和被测样块是采用同种材料经相同的加工方法而得到的, 因而其表面反射率相同。得到两表面镜反射光强分别为

$$I_{s1} = I_0 R^2 \exp \left(-\frac{16\pi^2 R_{q1}^2}{\lambda^2} \right) \quad (5-8)$$

$$I_{s2} = I_0 R^2 \exp \left(-\frac{16\pi^2 R_{q2}^2}{\lambda^2} \right) \quad (5-9)$$

因此

$$S = \frac{I_{s1}}{I_{s2}} = \exp \left(-\frac{16\pi^2 (R_{q1}^2 - R_{q2}^2)}{\lambda^2} \right) \quad (5-10)$$

式中, R_{q2} 为已知, 则 S 为只与 R_{q1} 有关的函数, 求得比值 S , 即可以计算或评定出表面粗糙度的表征值 R_{q1} 。

(2) 表面粗糙度检测装置及定标。表面粗糙度检测装置如图 5-9 (b) 所示, 在该装置中, 系统采用溴钨灯光源, 经透镜耦合到光纤传感器使用的二个 Y 型同轴光纤束传输光束的入射端, 再由光纤内芯投射到试件表面, 光纤外环接收反射光。光电转换器件采用两只性能相同的 PIN 光电二极管 VD_1 和 VD_2 , 为消除杂散光的干扰, 光纤外环出射端与光电二极管封装在一起。标准样品与被测样品的表面反射光信号 I_{s1} 和 I_{s2} , 经光电二极管分别转换成电信号 U_{s1} 和 U_{s2} , 再经过放大和 A/D 转换, 输入到单片机系统, 按式 (5-10) 处理比值 S 。最后, 求得被测试件表面粗糙度值, 并用数码管显示。



由于实践过程与理论推导所假定的条件相差较大,因而理论上推导出的公式并不完全适用,必须要对仪器进行在线定标,然后求出相应的拟合公式。

现在所使用的粗糙度标准是根据绝对测量法制定的。实际上,用触针法和用光切法得到的粗糙度的值有很大差异。根据国际规定,优先选用 R_a 值的原則,采用 R_a 值进行定标。定标所用的标准样块由长春市计量局触针法检定的一组标准粗糙度样块,并选用其中 R_a 为 $0.2\ \mu\text{m}$ 的样块作为标准样块(即测量中的比较标准)。通过对这组样块的测量,得到比值 S 同表面粗糙度 R_a 的关系曲线,应用最小二乘法,进行曲线拟合,得到 R_a 同比值 S 的数学公式。实际测量中应用这个公式,再由此比值 S 推导出表面粗糙度的计算公式。

实际的粗糙度表面是很不均匀的,即使对于标准样块,也存在着表面粗糙度很离散的问题,即 R_a 值波动很大。对于镜面反射光强,这是导致测量值离散度大的主要原因,因此,定标样块的测量精度直接影响定标曲线的精度。为了消除这种随机误差,采用了多点测量取平均值的方法。实验中,对 $R_a=0.2\ \mu\text{m}$ 的标准样块,在 $20\ \text{mm}$ 场的范围内,每隔 $0.5\ \text{mm}$ 测量一点,光纤的光斑直径大约为 $3\ \text{mm}$,这样测得的镜面反射光强值,基本上真实地反映了表面粗糙度为 $0.2\ \mu\text{m}$ 的表面反射光强,此值即为比较标准 I_{s1} 。据此,即可求出比值为 $S_i=I_{si}/I_{s1}$,经计算机作曲线拟合得到拟合公式

$$S = 1.0625e^{-0.325R_a} \quad (5-11)$$

式(5-11)与理论推导结果基本一致。这样,用标准样块比较法可以消除其他因素(如切削液等)对测量值的影响。

3. 用 Y 型光纤传感器检测光密度

由于是反射式 Y 型光纤传感器,因而这里主要讨论反射密度 D 。其定义是,反射密度 D 是投射到试样上的入射光通量 Φ_i 与反射光通量 Φ_r (指在某个反射角范围内)之比的常用对数值,即

$$D = \log \frac{\Phi_i}{\Phi_r} \quad (5-12)$$

也可写成

$$D = \log \Phi_i - \log \Phi_r \quad (5-13)$$

但在实际测量中,必须将光通量测量转化成电压测量。对于一个线性系统,光通量转换为电压有下面的关系式

$$U = K\Phi \quad (5-14)$$

式中, Φ 为入射光通量; K 为比例系数; U 为转换出来的电压。

若 Φ_i 与 Φ_r 分别转换的电压为 U_i 与 U_r ,则由式(5-13)与式(5-14)可得出下式

$$D = \log U_i - \log U_r \quad (5-15)$$

对反射式光电密度测量,无法获得 U_r 本身,而是用一密度已知的“标准密度板”,间接地得出 U_i 。

设标准密度板的密度为 D_1 ,测量其密度得出信号电压为 U_{r1} ,根据式(5-15)可得

$$D_1 = \log U_i - \log U_{r1}$$

于是可得

$$\log U_i = D_1 + \log U_{r1} \quad (5-16)$$

将式(5-16)代入式(5-15),即可得出所测量的密度值表达式为

$$D = D_1 + \log U_{f1} - \log U_f \quad (5-17)$$

光密度测量的具体步骤是:

- (1) 将已知的标准的不同密度或色阶片放在反射板上,用Y型光纤探头压住。
- (2) 对色阶片(或密度阶片)逐一进行测试,并记录其输出电压值。
- (3) 将欲测试的不同深浅色的未知密度纸放入反射板上测试,并记录其输出电压值。
- (4) 将未知的与已知值进行比较,与已知相等或极接近的电压值所标注的密度,即为所要测量的密度值。

用这种反射式Y型光纤传感器除测量位移、密度、粗糙度之外,还可用来测量电机的转速,测量微小振动的振幅与频率等,其传感原理基本相同,有兴趣的读者,可自己设计其测量方案。

4. 用Y型光纤传感器测量振动频率

用Y型光纤传感器测量振动频率的装置图,如图5-10所示,它由Y型光纤传感器、光源(图中为发光二极管)、光电探测器件(图中为光敏三极管)、振动机构等部分组成。这个装置工作时,光量传输过程与前面位移测量基本相同,其不同的是反射镜面与Y型光纤传感器端面间距离变化,受振动机构控制。一般,在振幅不变的情况下,如改变振动频率,在数字电压表上,就可以得到一系列与振动频率相对应的电压值。

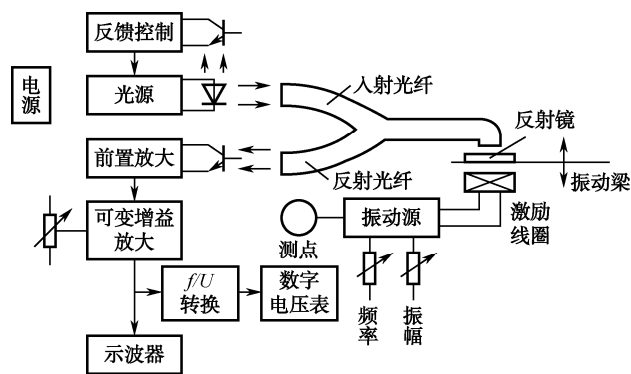


图 5-10 用Y型光纤传感器测量振动频率

5. 用Y型光纤传感器测量转速

用Y型光纤传感器测量转速(如电机转速)的原理,如图5-11所示。这个测量装置有一个实现转动的机构,并有转速调制器。Y型光纤传感器测量转速的过程,也类同于前面所讲的位移、振动测量。光源(图中为发光二极管)发出的光,由入射光纤传输,并投射到转盘的反射镜上,然后将光反射回光纤,并出射到光敏器件(图中为光敏三极管)上。显然,当反射镜随转盘旋转时,其位置会发生周期性变化,则光敏器件的输出信号也周期性变化,这个变化周期就是转盘(或电机)的旋转速度,这样就实现了转速测量。

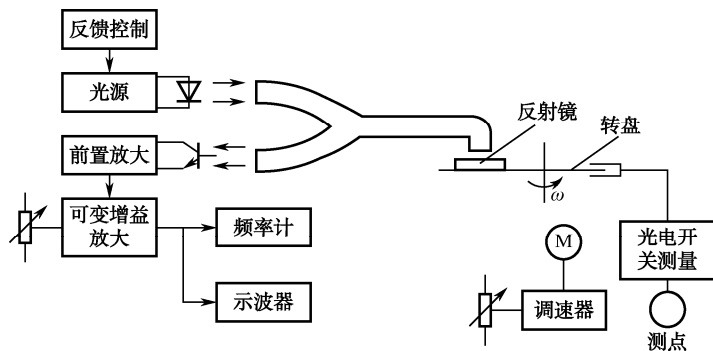


图 5-11 用 Y 型光纤传感器测量转速

5.3 光纤光栅型传感器技术

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性（外界入射光子和纤芯内锗离子相互作用引起折射率的永久性变化），在纤芯内形成空间相位光栅，其作用实质上是在纤芯内形成一个窄带的（透射或反射）滤波器或反射镜，使得光在其中的传播行为得以改变和控制。光纤光栅传感器是在光纤光栅的基础上发展起来的一种波长调制型光学传感器，它不仅具有光纤传感器所有的优点，而且有光纤光栅检测信息为波长编码的具有 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 四个数量级线性响应的绝对测量和良好的重复性的主要优势。其插入损耗低和窄带的波长反射，提供了在一根单模光纤上复用多个光纤光栅的可能性，便于构成光纤传感网络，实现光纤网络中的星状、串联、并联和环状连接等优点，是光纤传感器中的研究亮点。

5.3.1 光纤光栅型传感器的类型

随着光纤光栅制作技术的不断发展以及光纤光栅应用范围的日益扩大，光纤光栅的种类也日益增多。根据不同的分类标准，可以把光纤光栅分成不同的类别。

1. 按光纤光栅的周期分类

（1）短周期光纤光栅（FBG）。光栅周期小于 $1\ \mu\text{m}$ 的光纤光栅，称为短周期光纤光栅，又称为光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Grating, FBG）。FBG 中传输方向相反的两个模式之间发生耦合，如图 5-12（a）所示，所以 FBG 是一种反射型工作器件，其功能实质上是在光纤内的一个窄带反射镜。

（2）长周期光纤光栅（LPG）。光栅周期为几十到几百 μm 的光纤光栅，称为长周期光纤光栅（Long-period grating, LPG）。LPG 中耦合发生在同向传输的纤芯导模和包层模之间，如图 5-12（b）所示，包层模很快损失掉，所以 LPG 基本上没有后向反射，在其透射谱中有几个特定波长的吸收峰。它是一种透射型工作器件，其功能实质上是透射型带阻滤波器，是 EDFA 增益平坦和光纤传感的理想元件。

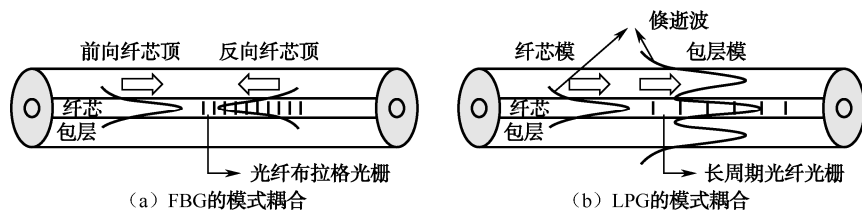


图 5-12 长短周期光纤光栅的模式耦合

2. 按光纤光栅的轴向折射率分布分类

根据光栅空间周期和折射率分布不同,可大致分为以下几种(如图 5-13 所示)。

(1) 均匀光纤光栅 (Uniform Fiber Grating)。均匀光纤光栅如图 5-13 (a) 所示,它是最早发展起来的一种光栅,也是最常见的光栅,其栅格周期与折射率调制深度均为常数,其光栅周期一般为几百 nm,光栅波矢方向与光纤轴线方向一致。这种光纤光栅具有较窄的反射带宽(约 10^{-1} nm)和较高的反射率(约 100%),其反射谱具有对称的边模旁瓣。

(2) 闪耀光纤光栅 (Blazed Fiber Grating)。闪耀光纤光栅如图 5-13 (b) 所示,也称为倾斜光纤光栅 (Tilted Fiber Grating)。在光栅制作过程中,紫外侧写光束与光纤轴不严格垂直,导致光栅条纹与光纤轴有一个小角度。闪耀光栅不仅引起反向导波模耦合,而且还还将基模耦合至包层模中或辐射模中,于是在光栅传输曲线上,布拉格波长的短波方向会出现一系列损耗带,其强度随闪耀角大小而变,对应着基模和反向传输的其他导模之间的耦合。闪耀光纤光栅主要用于 EDFA 的增益平坦和空间模式耦合器。

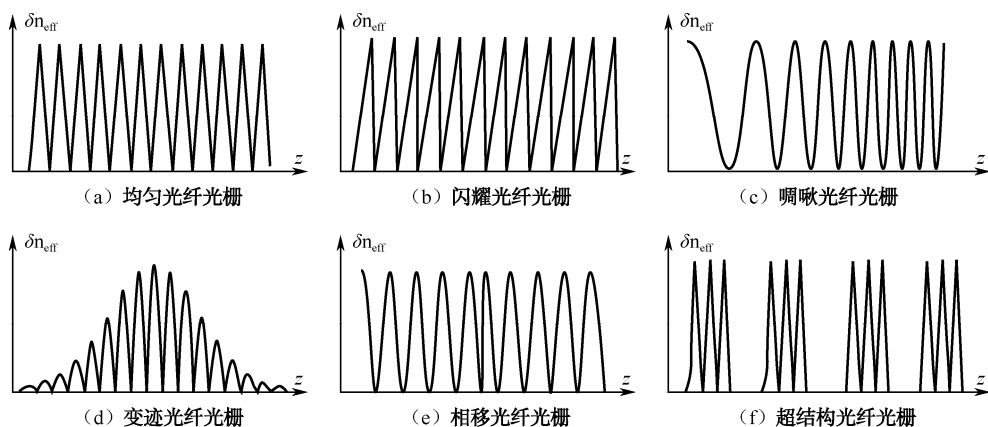


图 5-13 按折射率分布分类的光纤光栅

(3) 啁啾光纤光栅 (Chirped Bragg Grating)。啁啾光纤光栅如图 5-13 (c) 所示,它的周期不是常数而是沿轴向单调变化的,有线性啁啾光纤光栅和非线性啁啾光纤光栅两种。由于不同的栅格周期对应于不同的反射波长,啁啾光栅能够形成很宽的反射带。啁啾光栅能够产生大而稳定的色散,被广泛用于波分复用系统中的色散补偿元件。

(4) 变迹光纤光栅 (Apodised Fiber Grating)。变迹光纤光栅如图 5-13 (d) 所示,它采用特定的函数对光纤布拉格光栅的折射率调制深度进行调制,可形成变迹光纤光栅。变迹对均匀光纤光栅反射谱的边模旁瓣具有很强的抑制作用,选择不同的变迹函数能起到不同的抑制效果,常用的变迹函数有高斯函数、双曲正切函数、余弦函数和升余弦函数等。这种光栅在 DWDM



中有很重要的应用。

(5) 相移光纤光栅 (Phase-Shifted Fiber Grating)。相移光纤光栅如图 5-13 (e) 所示, 它是在均匀周期光纤光栅的某些点上, 通过某些方法破坏其周期的连续性而得到的。可以把它看成若干个周期性光栅的不连续连接, 每个不连续连接都会产生一个相移。相移布拉格光纤光栅能够在布拉格反射带中打开透射窗口, 使得光栅对某一波长或多个波长有更高的选择度, 可以用这个特点来构造多通道滤波器, 能更好地满足 EDFA 增益平坦的需要。

(6) 超结构光纤光栅 (Superstructure Fiber Grating)。超结构光纤光栅如图 5-13 (f) 所示, 其折射率调制是周期性间断的, 相当于在光纤布拉格光栅或啁啾光纤光栅的折射率调制上又加了一个调制函数, 即可将其看成对光纤布拉格光栅或啁啾光纤光栅按照一定的规律在空间上进行取样的结果, 因此超结构光纤光栅又称为取样光纤光栅, 其反射谱具有一组分立的反射峰。这种光纤光栅在梳状滤波器以及多波长激光器领域具有应用价值, 可实现多个信道的同时补偿。

除上述以外, 还有采用两个具有微小周期差异的紫外条纹对光纤的同一位置进行二次曝光的莫尔光栅, 其谱特征是在反射带中开了一个很窄的透射窗口。实际上, 莫尔光栅相当于一个 $\lambda/4$ 的相移光栅。

此外, 按光纤光栅的形成机理还可分为利用光纤光敏性形成的光纤光栅与利用弹光效应形成的光纤光栅等, 这里就不详述了。目前, 光纤光栅传感器主要包括光纤布拉格光栅传感器、啁啾光纤光栅传感器、长周期光纤光栅传感器和光纤布拉格光栅激光传感器等。下面重点介绍光纤布拉格光栅传感器的工作原理, 光纤光栅传感器的优点及其典型应用。

5.3.2 光纤布拉格光栅传感器的原理及优点

1. 光纤布拉格光栅传感器的工作原理

光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 是衍射光栅概念的发展, 其衍射是由光纤内部折射率的变化实现的。FBG 利用掺杂 (如锗、磷等) 光纤的光敏性, 通过紫外写入的方法使外界入射光子和纤芯内的掺杂粒子相互作用, 导致纤芯折射率沿纤轴方向周期性或非周期性的永久性变化, 在纤芯内形成空间相位光栅, 如图 5-14 所示。图中, FBG 的周期 Λ 一般小于 $1\ \mu\text{m}$ 。

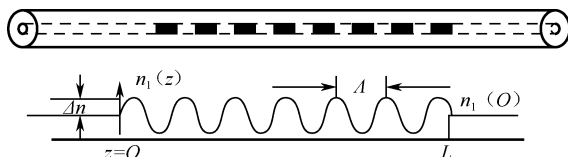


图 5-14 均匀周期 FBG 的结构

FBG 传感的基本原理如图 5-15 所示。当一束光送进 FBG 时, 根据光栅理论, 在满足布拉格条件的情况下, 就会发生全反射, 其反射光谱在布拉格波长处出现峰值。光栅受到外部物理场 (如应力应变、温度等) 的作用时, 其栅距 Λ 随之发生变化, 从而改变了后向反射光的波长。根据 $\Delta\lambda_B$ 变化的大小就可以确定待测部位相应物理量的变化。

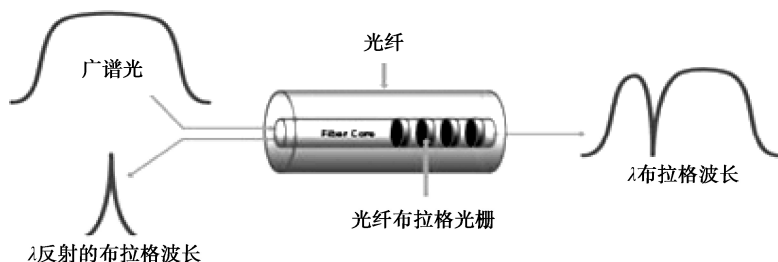


图 5-15 FBG 传感原理

FBG 好像一个窄带的反光镜,只反射一个波长而透射其余的波长。被反射的波长称为布拉格波长,满足光纤光栅的布拉格方程式,即满足条件

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (5-18)$$

式中, Λ 为布拉格光栅周期; n_{eff} 为反向耦合模有效折射率。该方程式为光纤光栅在外界作用下布拉格波长的传感响应提供了理论工具,即任何使这两个参量发生改变的过程,都将引起光栅布拉格波长的移位。因此,常见的 FBG 传感器,就是通过测量布拉格波长的移动(或漂移)而实现对被测量的检测的。

在所有引起光栅布拉格波长移位的外界因素中,最直接的是应力、应变参量。因为无论是对光栅进行拉伸或挤压,都将导致光栅周期 Λ 的变化,并且光纤本身所具有的弹光效应,使得有效折射率也随着外界应力状态的变化而改变。据此,可用光纤布拉格光栅制成灵敏的光纤传感器。其中,应力引起光栅布拉格波长的移位可以由下式统一描述

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda + 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda \quad (5-19)$$

式中, $\Delta\Lambda$ 为光纤本身在应力作用下的弹性形变; Δn_{eff} 为光纤的弹光效应。不同的外界应力状态将导致 $\Delta\Lambda$ 和 Δn_{eff} 的不同变化。因此,只要检测到反射信号中光栅布拉格波长的移位 $\Delta\lambda_B$,即可检测到待测传感量的变化。

从弹光效应的角度来看,光纤光栅对纵向压力较横向压力更为敏感。综合弹光和波导两种效应,光纤光栅对于均匀横向应力的灵敏度较纵向伸缩要小,因而在复杂应力情况下,由纵向压力引起的波长移位将会占主要地位。

若只考虑轴向应变(即纵向压力)时,则引起中心波长位移的相对变化为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -\frac{n_{\text{eff}}^2}{2}\Delta\left(\frac{1}{n_{\text{eff}}^2}\right) + \epsilon_z = (1 - P_{\text{ei}})\epsilon_z \quad (5-20)$$

式中, P_{ei} 为光纤光栅应变灵敏度系数, ϵ_z 为轴向应变。由式(5-20)可得

$$\epsilon_z \propto \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (5-21)$$

由公式(5-21)看出,反射波长的变化与应变成正比,也就是说,由反射波长的变化可以得到相应的应变力。

外界温度改变,同样也会引起光纤光栅布拉格波长的移位。从物理本质看,引起波长移位的原因主要有:光纤热光效应、光纤热膨胀效应、光纤内部热应力引起的弹光效应。从光栅布拉格方程式(5-18)出发,当外界温度改变时,对式(5-19)展开,可得到温度变化 ΔT 时所引起的光纤光栅布拉格波长的移位。通过理论推导证实,当材料确定后,光纤光栅对温度的灵敏度系数是与材料系数相关的常数,这就从理论上保证了采用光纤光栅作为温度传感能得到很好的输出线性。因此,对于纯熔融石英光纤,当不考虑外界因素的影响时,其温度灵敏度系数基

本上取决于材料的折射率温度系数,而弹光效应与波导效应将不对光纤光栅的波长移位造成显著影响。故可得到下列表达式,即

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_n + \alpha_\lambda)\Delta T \quad (5-22)$$

式中, α_n 为热光系数; α_λ 为线性热膨胀系数。对于熔融石英光纤, $\alpha_n=0.86\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, 而 $\alpha_\lambda=5.5\times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ 。由式(5-22)可看出,反射波长的变化与温度变化 ΔT 成正比,即由反射波长的变化可以得到相应的温度变化量。对 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长,可得到单位温度变化下引起的波长移位为 $10.8\ \text{pm}/^\circ\text{C}$ 。

2. 光纤光栅传感器的优点

光纤光栅传感器除具有一般光纤传感器的优点外,还具有下列突出的优点。

(1) 抗干扰能力更强,有很高的可靠性和稳定性。FBG 传感器以反射光的波长变化来感知被测参量的变化,只需要探测到光纤中光栅波长的移动,而与光强无关,对光强的波动不敏感,比一般的光纤传感器具有更高的抗干扰能力。FBG 传感器是用波长编码的传感器,光源强度的起伏、光纤微弯效应引起的随机起伏、耦合损耗等都不可能影响传感信号的波长特性,因而该传感系统具有很高的可靠性和稳定性。

(2) 测量灵敏度高、分辨率高、精度高,具有良好的重复性。FBG 传感器明显优于普通光纤传感器的地方是它的传感信号为波长调制,其测量信号不受光源起伏、光纤弯曲损耗、连接损耗和测量仪器老化等因素影响,所以测量结果具有良好的重复性。目前对 FBG 波长移动的探测达到了 pm 量级的高分辨率,因而具有比传统光纤传感器的测量灵敏度高、精度高的特点。

(3) 动态范围大、线性好,能自定标,可用于对外界参量的绝对测量。光纤布拉格光栅传感器,由于拉、压应力都能对其产生布拉格波长的变化,因此该传感器在结构检测中具有优异的变形匹配特性,其动态范围大(达 $10\ 000\times 10^{-6}\varepsilon$)和线性度好。并且,光纤布拉格光栅传感器避免了一般干涉型传感器中相位测量的不清晰和对固定参考点的需要,在对光纤布拉格光栅进行自标定后,能实现对外界参量变化的长期绝对测量。

(4) 能在同一根光纤内集成多个传感器复用,便于构成各种形式的光纤传感网络。光纤布拉格光栅传感非常适于做成多路复用式和分布式的光纤传感器,因为在一根光纤上的不同位置可以写入不同反射波长的布拉格光栅。图 5-16 所示即为光纤光栅传感器在一根光纤内实现多点测量的示例。如美国的 MICRON-OPTICS 公司所研制的 FBG 应用系统 Si425,可同时测量多达 4 路 512 个 FBG 传感器,扫描范围 $50\ \text{nm}$ 、分辨率 $1\ \text{pm}$ 、测量频率可达 $244\ \text{Hz}$ 。

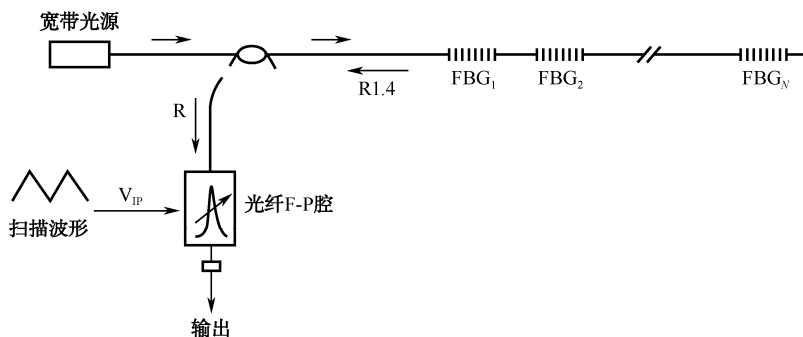


图 5-16 利用单根光纤实现多点的分布式测量

FBG 型分布式传感系统在应力多点分布式测量中有独到的优点,可同时完成温度和应力的双参量测量,为 FBG 应用开辟了更为广阔的前景。图 5-17 介绍了采用 WDM/TDM 解调的 FBG 阵列的拓扑结构。显然,这种光纤光栅传感器,便于构成各种形式的光纤传感网络。

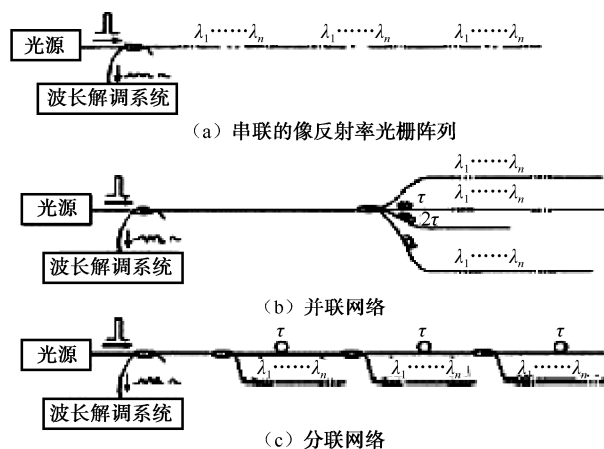


图 5-17 采用 WDM/TDM 的 FBG 阵列的拓扑结构

(5) 便于远距离(5 km 以上)监测桥梁等建筑物,能预/报警而使系统实现智能化。在光纤光栅应变测试系统中,光纤光栅传感器获取的稳定、高精度的波长信号,通过光缆远程传输送入调制解调器,然后直接输入计算机信息处理系统计算出对应的应变量。这样,可利用桥梁等建筑物结构状况评估的专家系统,对桥梁等结构作出安全(正常)和不安全就预/报警的评价,而使系统实现智能化。同时,还能将评估报告或桥梁等的健康状况信息通过互联网及时传输至桥梁等管理部门,从而可实现结构在线健康监测的信息化管理。并且,桥梁等现场到解调仪之间仅需一根光缆连接,其距离可达 5 km 以上,能实现桥梁的分布测量和集中监测处理。

(6) 结构简单、寿命长,便于维护保养、便于扩展与安装。传感探头结构简单、尺寸小,因其外径和光纤本身等同,也便于扩展与安装,并适合各种应用场合,并且传感系统自身运行可靠、传感元件寿命长,其解调器及后续的处理设备可置于集中监控室,避免了仪器在现场难于保护的缺点,便于保养和维修,从而提高了监测系统的可靠性和易维护性。

(7) 光栅的写入工艺已较成熟,便于形成规模生产。目前,光纤布拉格光栅通过紫外写入的方法已较成熟,这种紫外写入使外界入射光子和纤芯内的掺杂粒子相互作用,导致纤芯折射率沿纤轴方向周期性或非周期性的永久性变化,从而较容易在纤芯内形成空间相位光栅,因而也便于形成规模生产。

(8) 便于做成智能传感器,应用非常广泛。光纤光栅传感器可拓展的应用领域有许多,如将分布式光纤光栅传感器嵌入材料中形成智能材料,而便于做成智能传感器。智能材料是指将敏感元件嵌入被测构件基体和材料中,从而在构件或材料常规工作的同时实现对其安全运转、故障等的实时监控。其中,光纤和电导线与多种材料的有效结合是关键问题之一,尤其是实现与纺织材料的自动化编织。图 5-18 展示了一件嵌入光纤和电导线的背心。其中光纤和电导线的嵌入均已实现了自动化,为智能型服装的商业化解决了又一难题。

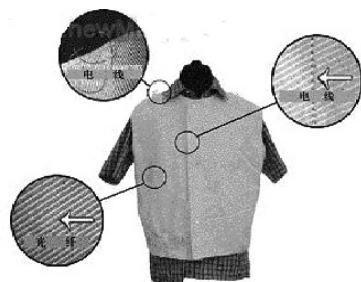


图 5-18 智能背心



当前, 光纤光栅传感器被普遍认为是实现光纤灵巧结构、光纤机敏材料的理想器件, 它对大型构件的载荷、应力、温度和振动等参数进行实时安全监测, 其光栅也可以代替其他类型结构的光纤传感器, 用于化学、压力和加速度等传感中。

5.3.3 光纤光栅型传感器技术的典型应用

1. 在地球动力学中的应用

在地震检测等地球动力学领域中, 地表骤变等现象的原理及其危险性的估定和预测是非常复杂的, 而火山区的应力和温度变化是目前为止能够揭示火山活动性及其关键活动范围演变的最有效手段。光纤光栅传感器则可应用在岩石变形、垂直震波的检测, 以及作为地形检波器和光学地震仪使用等方面。活动区的应变通常包含静态和动态两种: 静态应变(包括由火山产生的静态变形等)一般都定位于与地质变形源很近的距离; 而以震源的震波为代表的动态应变, 则能够在与震源较远的地球周边环境检测到。为了得到相当准确的震源或火山源的位置, 更好地描述源区的几何形状和演变情况, 需要使用密集排列的应力-应变测量仪。光纤光栅传感器是能够实现远距离和密集排列复用传感的宽带、高网络化传感器, 符合地震检测等的要求, 因此它在地球动力学领域中无疑具有较大的潜在用途。有报道指出, 光纤光栅传感器已成功检测了频率为 $0.1 \sim 2 \text{ Hz}$, 大小为 $10 \sim 9\epsilon$ (应变) 的岩石和地表动态应变。

2. 在航天器及船舶中的应用

先进的复合材料抗疲劳、抗腐蚀性能较好, 而且可以减轻船体或航天器的重量, 因此复合材料越来越多地被用于制造航空航海工具(如飞机的机翼)。为全面衡量船体的状况, 需要了解其不同部位的变形力矩、剪切压力、甲板所受的冲击力, 对于普通船体大约需要 100 个传感器, 因此波长复用能力极强的光纤光栅传感器最适合于船体检测。光纤光栅传感系统可测量船体的弯曲应力, 而且可测量海浪对湿甲板的冲击力。具有干涉探测性能的 16 路光纤光栅复用系统成功实现了在带宽为 5 kHz 范围内、分辨率小于 $10 \text{ ne/Hz}^{1/2}$ 的动态应变测量。

此外, 为了监测一架飞行器的应变、温度、振动、起落驾驶状态、超声波场和加速度情况, 通常需要 100 多个传感器, 故传感器的重量要尽量轻, 尺寸尽量小, 因此最灵巧的光纤光栅传感器是最好的选择。实际上, 飞机的复合材料中存在两个方向的应变, 嵌入材料中的光纤光栅传感器是实现多点多轴向应变和温度测量的理想智能元件。

3. 在民用工程结构中的应用

民用工程的结构监测是光纤光栅传感器最活跃的领域, 力学参量的测量对于桥梁、矿井、隧道、大坝、建筑物等的维护和状况监测是非常重要的, 通过测量上述结构的应变分布, 可以预知结构局部的载荷及状况。光纤光栅传感器可以贴在结构的表面或预先埋入结构中, 对结构同时进行冲击检测、形状控制和振动阻尼检测等, 以监视结构的缺陷情况。另外, 多个光纤光栅传感器可以串接成一个传感网络, 对结构进行准分布式检测, 可以用计算机对传感信号进行远程控制。

光纤光栅传感器用于检测桥梁时, 一组光纤光栅被粘于桥梁复合筋的表面, 或在梁的表面开一个小凹槽, 使光栅的裸纤芯部分嵌进凹槽得以保护。如果需要更加完善的保护, 则最好是

在建造桥时把光栅埋进复合筋,由于需要修正温度效应引起的应变,可使用应力和温度分开的传感臂,并在每一个梁上均安装这两个臂。

两个具有相同中心波长的光纤光栅代替法布里-珀罗干涉仪的反射镜,形成全光纤法布里-珀罗干涉仪 (FFH),利用低相干性使干涉的相位噪声最小化,实现了高灵敏度的动态应变测量。用 FFPI 结合另外两个 FBG,其中一个光栅用来测应变,另一个被保护起来,免受应力影响,以测量和修正温度效应,所以 FFP-FBG 实现了同时测量三个量:温度、静态应变、瞬时动态应变。这种方法兼有干涉仪的相干性和光纤布拉格光栅传感器的优点,已在 $5\text{ m}\epsilon$ 的测量范围内,实现了小于 $1\text{ }\mu\epsilon$ 的静态应变测量精度、 0.1°C 的温度灵敏度和小于 $1\text{ n}\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$ 的动态应变灵敏度。

4. 在电力工业中的应用

电力工业中的设备大都处在强电磁场中,如高压开关的在线监测,高压变压器绕组、发电机定子等地方的温度和位移等参数的实时测量,电类传感器无法使用,而光纤光栅传感器在高电压和大电流中,具有高绝缘性和强抗电磁干扰的能力,因此适合在电力行业应用。用常规电流转换器、压电元件和光纤光栅组成的综合系统对大电流进行间接测量,电流转换器将电流转换成电压,电压变化使压电元件形变,形变大小由光纤光栅传感器测量。封装于磁致伸缩材料的光纤光栅可测量磁场和电流,可用于检测电机和绝缘体之间的杂散磁场通量。

5. 在医学中的应用

医学中用的电子传感器,对许多内科手术是不适用的,尤其是在高微波(辐射)频率、超声波场或激光辐射的过高热治疗中。因为电子传感器中的金属导体很容易受电流、电压等电磁场的干扰而引起传感头或肿瘤周围的热效应,这样会导致错误读数。为测定高频辐射或微波场的安全性,需用超声波传感器检测一系列医疗(包括超声手术、过高热治疗、碎结石手术等)中所用的超声诊断仪器的性能。近年来,使用高频电流、微波辐射和激光进行热疗以代替外科手术越来越受到医学界的关注,而且传感器的小尺寸在医学应用中非常重要。因为小的尺寸对人体组织的伤害较小,显然光纤光栅传感器是目前为止能够做到的最小的传感器,它能够通过最小限度的侵害方式测量人体组织内部的温度、压力、声波场的精确局部信息。到目前为止,光纤光栅传感系统已经成功地检测了病变组织的温度和超声波场,在 $30\sim 60^\circ\text{C}$ 的范围内,获得了分辨率为 0.1°C 和精确度为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 的测量结果,超声场的测量分辨率为 $10^{-3}\text{ atm/Hz}^{1/2}$,这为研究病变组织提供了有用的信息。

光纤光栅传感器还可用来测量心脏,如医生把嵌有光纤光栅的热稀释导管插入病人心脏的右心房,并注射一种冷溶液,可测量肺动脉血液的温度,结合脉功率就可知道心脏的血液输出量,这对于心脏监测是非常重要的。

6. 在化学传感中的应用

光纤光栅传感器可用于化学传感,光栅的中心波长随外界折射率的变化而变化,而环境中化学物质的浓度变化都会引起折射率的变化,进而通过波导模式的倏逝场影响光栅的共振波长。利用该原理,可通过对 FBG 进行特殊处理或直接用 LPG 制成各种化学物质的光纤光栅传感器。

LPFG 对光纤外界折射率的变化比光纤布拉格光栅更为敏感,长周期光栅折射率测量系统



的分辨率最高可实现 10^{-7} 的灵敏度。目前已经用长周期光栅测出了许多化学物质的浓度,包括蔗糖、乙醇、十六烷、 CaCl_2 、 NaCl 等。原则上,任何具有吸收峰谱并且其折射率在 $1.3 \sim 1.45$ 之间的化学物质,都可用长周期光纤光栅进行探测。

7. 在核工业中的应用

核工业是个高辐射的地方,核泄漏对人类是一个极大的威胁,因此对于核电站的安全检测是非常重要的。由于光纤光栅传感器具有耐辐射的能力,可以对核电站的反应堆建筑或外壳结构进行变形监测,蒸气管道的应变传感,以及地下核废料堆中的应变和温度等。

除上述应用外,光纤光栅传感器还在其他领域得到了应用,并且在许多方面的性能都比传统的机电类传感器更稳定、更可靠、更准确。如可利用光纤布拉格光栅传感器智能检测汽车超载与组建周界围栏入侵报警系统,这将在安防应用中论述。总之,光纤光栅传感器的应用是一个方兴未艾的领域,有着非常广阔的发展前景。

5.4 多路复用和分布式光纤传感器及其在安防中的应用

光纤传感器(OFS)虽然具有较好的技术性能,但其成本相对高一些。一个解决方法是用多个测点取代单个测点,即在空间分布多个测量点,或在由一个读出单元服务的同一线路布置多个独立的传感器,来达到增加测量点数量的目的。这样,复用式或分布式光纤传感器成本就会降低,它只相当于总 OFS 成本的一小部分。目前,已研究出几种可行的方法来实现多路复用或分布式光纤传感器的结构。

5.4.1 多路复用式光纤传感器技术

光的多路复用技术实现复用的方式,除有常用的时分、波分复用外,还有空分和相干性分光纤传感器。

1. 时分复用式光纤传感器技术

时分复用 OFS 如图 5-19 所示,它被称为梯形结构,包括一个脉冲光源和一系列用耦合器连接到公共光纤上的传感器,公共光纤用于供给传感器信号以及收集返回信号。脉冲 τ 的时间比正在处理中的那个传感器经过的外部延迟 $2L/c$ 短得多。在这一条件下,每一个传感器在一个严格定义的时间段的脉冲下降沿开始响应,所以接收器可以对多路输出响应。为了区分从分离的传感器返回的脉冲,脉冲宽度 τ 应比每个附加段的延迟 $2L/c$ 短。传感器之间的附加的光纤长度可被加长,以达到匹配条件。

每一个耦合器分一部分功率到它的传感器上。为了等效地响应,第 n 个传感器的耦合因子应被设定为 $k_n=1/(N-n+1)$, 这里 N 是传感器的总数。

这样,第一个传感器有 $k_1=1/N$, 剩余的功率为 $1-1/N$; 第二个传感器有 $k_2=1/(N-1)$, 取出输入功率的 $(1-1/N)/(N-1)=1/N$, 剩余的功率为 $(1-2/N)$; 第三个传感器有 $k_3=1/(N-2)$, 并取走 $(1-2/N)/(N-2)=1/N$ 。这样,继续到第 N 个传感器有 $k_N=1$, 取走输入功率的 $1/N$ 。

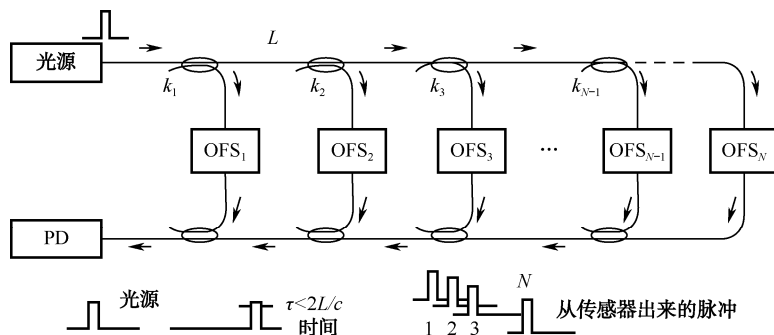


图 5-19 OFS 的时分复用技术

在光返回的路径上，被传送到公共光纤上的功率值是相同的，即为供给总功率的 $1/N$ 。因此，就寻址独立的传感器而言，复用操作引入的外部损耗为 $1/N^2$ 。考虑到光源的功率和接收器的灵敏度，损耗限制了可被多路选择的传感器数目，通常最多为 $N=15\sim 20$ 。

目前，时分复用式光纤传感器方案已被用于温度、应变、声发射等测量，特别是与海洋有关的应用的偏振，以及干涉型传感器中。

2. 波分复用式光纤传感器技术

波分复用技术包括为每一个独立的传感器分配波长的狭缝，以及使用频率可调的窄带光源读出复合输出。为了适用于级联，传感器需为频率选择性的，响应可以为透射式也可以为反射式，并能以反射或透射式方式通过，而不改变输出带的成分。光纤布拉格光栅（FBG）可满足上述需求。FBG 是一种纵向的光栅，通过在 UV 线下曝光，沿光纤轴形成折射率的周期变化 Δn 。若 Λ 是光栅的空间周期，布拉格条件 $2n\Lambda = \lambda_B$ 决定了谐振波长 λ_B 。对于那些波长与 λ_B 接近的光，该器件可将进来的光线反射回去，而偏离谐振（ $\lambda \neq \lambda_B$ ）的光，将不被改变地通过 FBG，因而可将 FBG 看成透射式的带阻滤波器或反射式的带通滤波器。

OFS 的波分复用技术如图 5-20 所示。

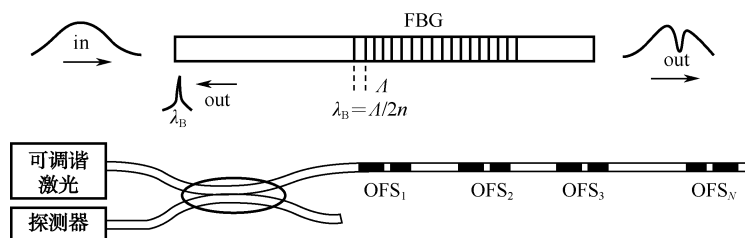


图 5-20 OFS 的波分复用技术

图 5-20 表示一个 FBG，它反射接近于谐振波长 λ_B 的光而透射其余的光。波分复用 OFS 以级联许多不同波长 λ_B 的 FBG 形式排列，为了读出每一个传感器的信号，使用了一个可调谐的激光光源。因为每一个 FBG（除了被选择的那一个）都是透明的，而被激光光源寻址的那个传感器将产生与其共振频率对应的峰值反射的响应。共振波长的偏移取决于作用于 FBG 上的温度 T 和应变 ϵ ，如果要避免测量 ϵ 时 T 的（或反之）交叉传感，应使用一对 FBG，使其对 T 和 ϵ 具有不同的灵敏度。通过将测量结果组合在两方程组中，可解出两被测量（ T 和 ϵ ）。

在图 5-20 中，使用了昂贵的可调谐激光光源，如果只有这种可能性，这种 OFS 就很难离



开实验室。因此,希望能改变波分复用读出思想,其解决方法之一如图 5-21 所示。

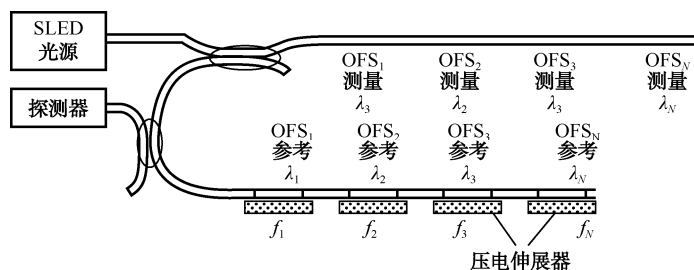


图 5-21 在测量和参考链中使用两组 FBG 的波分复用 OFS

在图 5-21 中,是在测量链和参考链中使用两组 FBG 的波分复用 OFS。相应的 OFS 名义上具有相同的谐振波长 λ_B ,从测量 OFS 回来的信号被引入参考 OFS 以比较其响应,用压电激励器(Piezo Actuator)调制参考 λ_B ,使得我们可以对每一个传感器的响应信号进行分离。

这里,使用了一个宽带光源照射传感器,并在传感器链中复制在测量链中的每一个 FBG,名义上它们有相同的谐振波长 λ_B 。

根据被测量,第 k 个传感器其谐振波长偏移 $\Delta\lambda_{Bk}$,为了同时测量所有的 $\Delta\lambda_{Bk}$ 的值,对参考链中每个第 k 个 FBG 施加合适的压力,以产生与测量链中对应 FBS 相同的偏移 $\Delta\lambda_{Bk}$ 。这可用压电激励器实现,即 PZT 厚片使在其上的 FBG 光纤伸长。为了对所有传感器独立地操作,每一个第 k 个压电器被不同电调制频率 f_k 激励。光电探测器的输出在中心为 f_k 谐振的 k 带被滤波,且在每一个带找出第 k 个 FBG 传感器的最大响应。

3. 空分复用式光纤传感器技术

空分是用开关将每一个独立的传感器与读出单元连接,一个紧接着一个依次读出。由于成本的原因,开关通常为机械式旋转器件,从一个传感器转换到另一个传感器的操作时间约需几秒钟。为了提高响应速度,可能要使用更复杂的方法,如开始用在 LiNbO_3 或在硅上面的硅石(SoS)上制作的马赫-泽德波导干涉仪,有两路开关,将输入通道连接到两个输出中的一个,由作用在控制电极上的电信号激励。通过 N 步级联,可实现 1×2^N 个开关阵列。显然,当 N 增加,成本便大幅度降低。但实际上是有限度的,通常, $N \leq 4$ 。

4. 相干性分复用式光纤传感器技术

相干性分复用技术是近期被提出的一种有趣的技术,可以认为它是白光干涉仪相干辅助读出概念的推广。如图 5-22 所示,可以利用每个 OFS 中两臂的不同的不平衡,实现几个干涉仪(如马赫-泽德尔干涉仪)的多复用。将它们都连接在双链上,一个链用于传感,另一个用于读出。图中,从低相干度光源发出的光,经过由臂长不平衡的不同的干涉仪组成的级联。在读出部分,耦合器将光分到对应序数的干涉仪中,这些干涉仪是传感部分臂长不平衡的复制。通过干涉仪传感和读出的交叉路径返回有用的信号。

在干涉仪中,使不平衡远大于相干长度 l_c ,即 $L_k - l_k \gg l_c$,另外让相邻的传感器之间的不平衡也比相干长度大,即 $L_k - L_{k-1} \gg l_c$ 。对于每一个的探测,例如第 k 个传感部分,发现信号是通过干涉仪以不同路径传输的许多场的贡献叠加而成的。除了以相交形式通过对应的 k 的两路即 OFS_k 和 R_k 外,所有的都不平衡且远大于相干长度 l_c 。而对应 k 的两路分别为 $l_k(\text{OFS}) + L_k(R)$ 和

$L_{k(\text{OFS})} + l_{k(\text{R})}$ ，且在别的干涉仪中通过的路径相同。因为只有合适的干涉仪中才会返回周期振动，所以可同时读所有复用的传感器。相干性是复用技术巧妙解决问题的关键，但其缺点是损耗太严重。

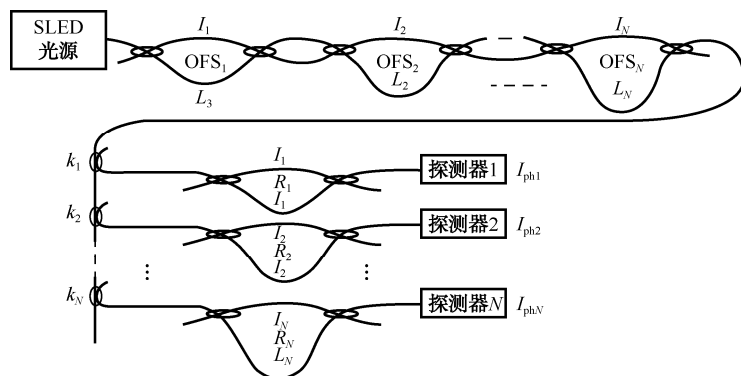


图 5-22 相干性分复用的 OFS 示意图

首先，通过像时分方案（图 5-19）那样选择 $k_n = 1/(N-n+1)$ ，使各通道的振幅相等，这样引起的损耗为 $1/N$ 。此外，对于传感部分的每一个干涉仪，由于无用的端口浪费因子为 2，额外增加了 2^N 衰减。实际上，除非引入昂贵的光学放大器，否则 N 很难超过 4。

总之，在设计一个新的系统时，只要有可能减少每点的成本，就应考虑复用技术这一思想。但无论如何，阵列的总成本很高，因为随着 N 的增加其复杂性也增加，所以实际上点数的最大值也有限制。

5.4.2 分布式光纤传感器技术

1. 分布式光纤传感器的基本概念

如果能够读出一定距离分布的光纤的光学参数，那么每分布间隔就定义一个独立的传感器，用于测量点的传感器就是一个分布式传感器。用于传感的绝大部分光学参数是与位置有关的，虽然是分布式传感器，但通常对由被测量影响的读出的光学参数取平均或积分。

从应用的观点出发，分布式传感器与基于传统技术的传感器相比，有一个决定性的优点，即它们可被看成复用传感器的极端形式。在复用传感器中，一个读出仪器服务于任意大量独立的传感点。分布式传感器每点的成本实际减少为 $1/N$ 。更重要的是，我们能研制具有大量点数的传感器，其点数比复用传输的传感器多得多。这一特点用传统技术无法替代，且在实际应用中具有很大优势。

在分布式传感器中，可以远距离寻址光纤并取得参数，从而得知被测量光纤段的距离，以及通过一光学参数和一读结构而读出被测量。一般，被测量为应变和温度，而一般光学参数为强度以及在独立传感点散射光的 SOP。

2. 用于分布式损耗传感的 OTDR 方案

用于分布式传感器寻址的方法有好几种，这些方法分为时域、频域及相干域。时域方法容



易被用于传感,因为它利用了光纤通信中研究出的仪器和测量技术来远距离测量沿光纤线路的损耗,这样的衰减分布测量的仪器被称为光时域反射仪(OTDR)。

OTDR 从 OFS 早期就被用在各种光纤中测量应力和温度。最初测量的相互作用机制在测量局部应力时是微弯曲,测量温度时是瑞利散射的温度系数。然而在普遍的硅石光纤中这两种效应都很小,所以使用了特殊光纤(液芯的或掺稀土元素的)试图提高灵敏度和分辨率。后来,通过改变 OTDR 的基本方案而不是光纤本身来提高其性能。一种是偏振光时域反射仪(POTDR),通过它以光纤双折射可得到距离分布式的 SOP 的测量。因为双折射对作用在光纤上的压力很敏感,所以 POTDR 对远距离探测以及确定光纤中或管道中(如与光纤浇注在一起)的机械应力的位置是一个强有力的工具。

用于分布式损耗传感的最基本的 OTDR 方案,如图 5-23 所示。

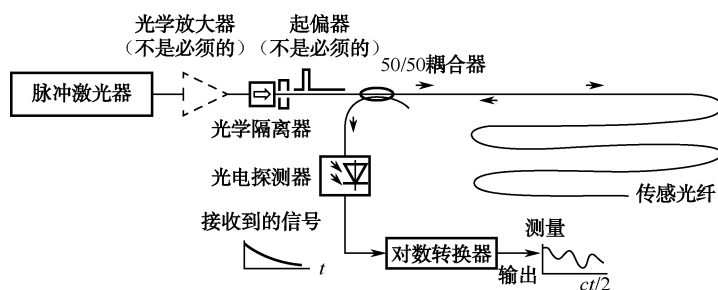


图 5-23 用于分布式损耗传感的最基本的 OTDR 方案

在一分布式光纤传感器中,某位置后向散射功率被 OTDR 读出。用于寻址的光学脉冲持续时间 τ_p 决定了测量的空间分辨率为 $c\tau_p/2n$,即实际传感元尺寸的大小。后向散射信号看起来与脉冲激光雷达中作用一样,探测后,从分布的衰减和后向散射得到因变量,从而计算信号的对数。与脉冲激光雷达 LIDAR 的思想类似,OTDR 利用合适波长的短脉冲源来寻址光纤,波长选在光纤窗内(850 nm、1 300 nm 或 1 500 nm)以使衰减最小,且覆盖范围在最大值处。

通常,半导体激光器由快速电流脉冲驱动,出射峰值功率为几十 mW 的脉冲激光。在光源后放置附加光学放大器,并用光学隔离器反射来自光纤的光以保护光源。如脉冲激光雷达 LIDAR 那样,脉冲持续时间 τ_p 决定了 OTDR 测量的空间分辨率。

如果探测器的响应时间 T 比脉冲持续时间短,即 $T \ll \tau_p$,则分辨率由式 $\Delta z = c\tau_p/2n$ 给出,这里 $n \approx 1.5$,是光纤的有效折射率。约 10 ns 的脉冲时间就很容易得到 $\Delta z \approx 1$ m 的分辨率。 Δz 也代表返回信号被平均的长度,所以也是分布式 OFS 提供的单元传感器的等效长度。

沿光纤传输的功率随着距离 z 呈指数衰减(即 $10^{-\alpha z}$,这里 α 是 dB/km 衰减)且 $\sigma_{bs}dz$ 是光纤在 z 处长度为 dz 单元产生的后向散射。后向散射系数 $\sigma_{bs}(z)$ 取决于光纤材料及被测量和光纤的相互作用。后向散射的能量在返回到光源的过程中先到达光纤耦合器,有一半的能量分出到光电二极管,被探测的输出信号经过对数转换,结果 $L(t)$ 给出与时间有关的衰减 α 和后向散射 σ_{bs} 。采用一般的光源和测量时间,OTDR 可能分辨 10^{-1} dB 的衰减,但如果这一分辨率是与有测量意义的温度和应变范围对应的话,则需要特殊的光纤,或需选择其他不同的光学参数如偏振。利用具有 $\lambda = 1\,500$ nm 的普通单模光纤的 POTDR,一般可得到的灵敏度约为 $100\,\mu\epsilon$ 的应变。

3. 用喇曼和布里渊弹性散射同时实现应变和温度的分布测量

提高性能的另一方法是用不同于通常与损耗有关的瑞利-格兰弹性散射的另一种散射。喇

曼和布里渊弹性散射提供了所需的机制。这里必须解释一下声子辅助的散射，在相互作用时引入一种虚拟能级，如图 5-24 所示。

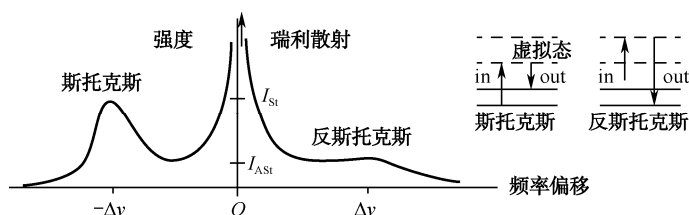


图 5-24 具有斯托克斯和反斯托克斯的瑞利散射光谱

由图 5-24 可看出，斯托克斯和反斯托克斯的峰值位于弹性散射的非常大的瑞利峰值两边，频移 $\Delta\nu$ 取决于散射类型。由于这一新能级，由散射产生的光获得或失去的能量为 $E_{sc} = h\Delta\nu$ ，所以与散射能级对应的谱线被 E_{sc} 从中间的瑞利-格兰（或弹性散射）线分为两条线，上下频率线分别称为斯托克斯或反斯托克斯线。

拉曼和布里渊散射是以它们相互作用的声子能量区分的。拉曼效应解决的是相对高能的光声子，所以在硅石中 $\Delta\nu_R \approx 13.2 \text{ THz}$ （或 $\Delta\lambda_R \approx 100 \text{ nm}$ ）。这样大的频率分离使得它较容易将弱的拉曼线从非常大的瑞利散射线中分出来，这在研读仪器上无疑是一个优势。布里渊效应处理的是声子且频率分离很小（ $\Delta\nu_B \approx 11 \text{ GHz}$ ，或 $\Delta\lambda_B \approx 0.08 \text{ nm}$ ），所以为分辨这些线需要窄线宽激光器和严格挑选的滤波器。

滞弹性散射的一个有趣的特征是与温度有清晰的和可重复的变量关系，而温度与斯托克斯或反斯托克斯线的相对振幅有关，这种关系可由下式给出。

$$I_{AS}/I_{St} = (\lambda_{St}/\lambda_{AS})^4 \exp(-hc/\lambda kT) \quad (5-23)$$

拉曼 OTDP 的研制可从作用在光电探测器上的后散射光的可分辨的波长测量开始，通过插入合适的光学滤波器以选出斯托克斯线。通过测量拉曼线的振幅，可计算出温度 T 。一个基于拉曼线比率测量的典型的分布式传感器在一个 1 m 长的单元上可分辨 1°C ，这 1 m 长的单元位于总的多模光纤的 10 km 处，所用光源峰值功率约为 500 mW，且 $\tau_p = 10 \text{ ns}$ 。

在应用中，如果仅需测量温度的分布，那么无疑将选择基于拉曼的方法，因为它的信号很强，且容易被分出来。然而用布里渊线，除了得到温度变量外，还可以从应变 $\Delta l/l$ 测量频率变化量 $\Delta\nu_B$ ，虽然 $\Delta l/l$ 很小，但是可测量的量，因为没有扰动的 $\Delta\nu_B$ 也很小。该变量可被写作 $\Delta\nu_B \approx \Delta\nu_{B0} + \xi \Delta l/l$ 。在硅石光纤中，应变系数 $\xi \approx 50 \text{ kHz}/\mu\epsilon$ 。

理论与实践已经证明，基于布里渊散射的实验装置能同时实现应变和温度的分布测量，它在 15 km 长的光纤上，得到的分辨率约为 4°C ， $\Delta l/l \approx 300 \mu\epsilon$ 。

5.5 光纤传感器技术在安防中的应用

随着现代光电信息科学技术的发展，光纤传感器技术迅速崛起，并越来越多地应用于安全防范、生活等的方方面面，大有取代电子传感器的趋势。



5.5.1 常用光纤传感器技术在安防中的应用

1. 用 Y 型光纤传感器鉴别纸币的真伪，以保障人民财产的安全

2004 年 8 月，广东中山百佳百特集团老总聘作者为该公司总工程师，我带领我的硕、博研究生团队给他们组建了高新技术研究所，在不到 2 年的时间内，开发了“纸币新旧级别鉴别系统”、“带点钞数据视频叠加的银行专用智能防伪点钞机”、“带点钞数据视频叠加的银行专用柜员制监控系统”、“银行存取款的声音识别系统”，并重点做了“伪钞检测工作站-纸币鉴定系统”这一大型项目（已用于批量生产）。就是在这个“伪钞检测工作站”中，我们自主创新地开发了很多纸币真伪识别技术，如纸币图像的白光与红外光检测识别技术，20 倍放大识别技术，纸币光谱识别技术，荧光色差识别技术，激光检测识别技术，用 Y 型光纤传感器检测识别技术等。实际上，这些都是光电信息的检测技术与方法，现这里主要是介绍用光纤传感器的检测识别方法。仅用这一方法就指导过电子科技大学光电信息学院叶玉堂教授（博导）的研究生蒋雁飞作了毕业设计课题，其论文“光纤传感器在纸币凹版印刷特征识别中的应用”，已发表在 2006.32（2）《中国测试技术》杂志上。因限于篇幅，这里不再作介绍，有兴趣读者可参阅这一杂志。

2. 用 Y 型光纤传感器监测微小振动的振幅与频率，以预防事故的发生

在前述的 Y 型光纤传感器的典型应用中，已简述了用 Y 型光纤传感器测量振动频率的问题，实际上利用该系统也可监测微振动。如无振动时，反射镜面与光纤传感器端面间距离不变化，其振幅与频率不变；当有振动发生时，反射镜面与光纤传感器端面间距离将发生变化，其振动振幅与频率均有变化。据此，可根据其变化的大小，来判断是否有地震或其他震动的发生，以预防异常事故。

5.5.2 光纤光栅型传感器技术在安防中的应用

1. 组建周界围栏入侵报警系统

多年来，传统的周界安防或围栏报警系统，如主动红外对射、微波对射、泄漏电缆、振动电缆、电子围栏、电网等，为安全技术防范做出了一定的贡献。但是，受一些客观技术条件等因素所限，还存在着一定的缺陷，如主动红外对射的围栏报警系统，易受地形条件的高低、曲折、转弯、折弯等环境限制，而且它们不适合恶劣气候，容易受高温、低温、强光、灰尘、雨、雪、雾、霜等自然气候的影响，易出现误报率；再如泄露电缆、振动电缆、电子围栏、电网等围栏报警系统，均属于有源的电传感，系统功耗很大。并且，电子围栏、电网等又有一定危害性；还易受电磁干扰、信号干扰、串扰等，使灵敏度下降、误报率、漏报率（如覆盖上电绝缘物翻过电围栏）上升。

与上述周界安防或围栏报警系统相比，利用新型光纤传感技术做成的周界安防或围栏报警系统，就具有非常明显的技术优势。

光纤周界围栏报警系统，可利用三种方法来实现：一是利用光时域反射（OTDR）技术；二是利用光纤干涉型光纤传感器；三是利用 FBG 分布式光纤传感器。

近年来,光纤光栅是发展最为迅速、应用最为广泛的光纤无源器件之一。由于它的敏感变化参量为光的波长,因而不受光源、传输线路损耗等因素所引起的对光强度变化的干扰,并且它易与系统及其他光纤器件连接而便于构成分布式传感系统,因此可实现实时测量和分布式测量。由于 FBG 具有优良的温度和应变响应特性,因而可用来制成应力、压力、震动、火灾与温度等传感器,尤其方便用于周界安防及围栏入侵报警系统中,所以它在国家与人民安全以及反恐斗争中将具有极大的实际意义和社会意义。

(1) FBG 传感周界围栏报警系统的组成及原理。FBG 传感周界围栏报警系统是利用激光、光纤传感和光通信等高科技技术构建的安全报警系统,是一种对威胁公众安全的突发事件进行监控和报警的现代防御体系。它是基于 FBG 分布式光纤传感技术应用于周界监控防护的新系统。

所设计的 FBG 传感周界围栏报警系统由宽带光源、耦合器、带所需个数 FBG 传感器(根据周界长度而设)的传感光纤与传输光纤、波长移动解调装置、信号处理系统等组成。其组成及原理框图如图 5-25 所示。

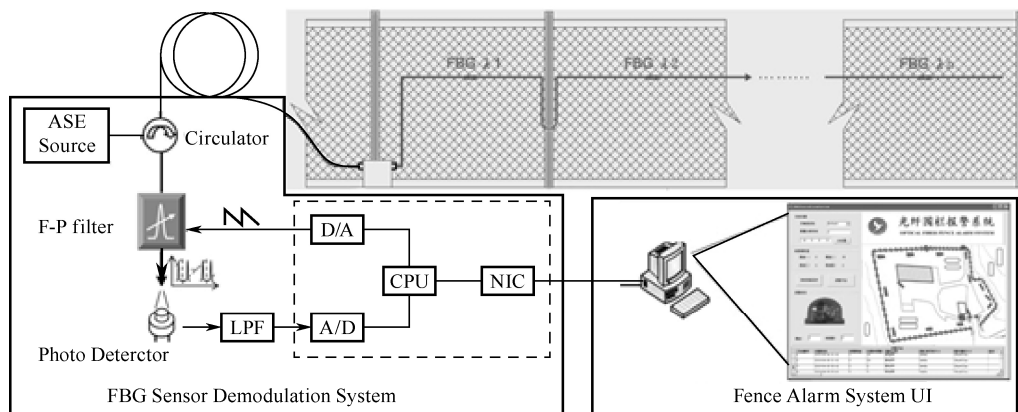


图 5-25 FBG 传感周界围栏报警系统的组成及原理

由图 5-25 可见,这种系统是利用单根光纤(在光敏性光纤上用紫外光写入所需个数的布拉格光栅)作为传感传输二合一的器件,通过对直接接触光纤或通过承载物,如覆土、铁丝网、围栏、管道等,传递给光纤(缆)的各种扰动,以进行全程任意点全天候不间断地持续和实时地监控。

FBG 传感周界围栏报警系统的工作原理是:由宽带光源发出的光,经耦合器传输到布设有所需个数的 FBG 周界传感光纤中,当其中的某点 FBG 传感器的光纤受到外界入侵的扰动后,即使该 FBG 的波长发生变化,其反射光波长调制数据经耦合器通过传输光纤送入监控室内,其输入的光到达波长移动解调装置,先由光电探测器接收放大,再送入波长移动解调电路解调,最后经信号处理系统分析处理和智能识别,以判断出外部有否危害入侵。对非危害性环境干扰如雷鸣、鞭炮、汽车鸣响、雨声等,也能进行识别,而可做出无害判断;当识别有攀爬铁丝网、按压围墙、禁行区域的奔跑或行走,以及可能威胁周界建筑物的机械施工等后,为提高可靠性,必须再经过周界监控摄像机所摄的监控图像的判断复核确定,才可实现系统预警或实时告警,以达到对侵入设防区域周界的威胁行为进行实时监测的目的。

对于局部高危区域,系统还可实现语音监听和记录。该功能完全无须采用电或金属的传感



器, 仅用光纤即可实现, 从而丰富了用单一光纤实现监控系统的功能和防护等级。

(2) 波长移动解调。实际上, 研究 FBG 传感器的关键问题是如何精确测量 FBG 反射波长的移动量。传统上一般应用光谱仪解调系统, 虽然近年出现的微型光谱仪体积小、价格便宜, 但其光谱分辨力只在 0.1 nm 数量级, 远远达不到 FBG 解调需要的 pm 级的分辨力。为了提高布拉格波长漂移量的测量精度, 各国学者研究了很多解调方法, 如边缘滤波器法, 可调谐滤波器法, 干涉仪扫描法与双腔干涉仪扫描法等。2007 年天津大学精仪学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 针对大型建筑结构监测应用领域研制了一种便携式 FBG 波长解调仪, 它基于无源比例解调原理, 以熔融拉锥器件作为线性滤波器, 采用锁相放大技术提取微弱信号, 并利用单片机控制 FBG 波长信息的采集、显示以及存储。该解调仪结构简单、成本低, 可实现大量程波长测量。实验表明, 该光纤光栅解调仪解调范围达 15 nm, 波长测量精度为 12.4 pm。

我们采用一种基于 F-P 可调谐滤波器和波长基准器, 并用插值-相关谱法进行处理。首先在原始光谱中每相邻两点间线性插入一些点, 再利用相关谱法得到布拉格波长移动量。该方法不但可以有效抑制噪声, 而且能精确地测量布拉格波长移动量, 从而实现高精度地测量温度、应变等外界参量。理论分析和实验表明: 采用相关谱法测量布拉格波长移动量是可行的, 且可以提高信噪比, 进而提高解调精度。在此基础上, 结合线性插值的方法, 在原始光谱中每相邻两点间插入一定数量的点, 可以进一步提高解调精度。采用这种解调方法可使布拉格光栅波长分辨力达到 1 pm, 温度测量精度达到 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 多处侵入定位及入侵模式特征。一般, 光纤布拉格光栅周界围栏报警系统存在多处同时受扰判断问题。因此, 在判断有威胁侵入行为发生时, 系统需能根据光信号调制的分析, 对侵入行为发生点实时进行定位, 从而便于安保人员对目标明确地及时采取有效措施, 以制止侵入行为后续事件发生。

为解决光纤围栏报警系统中多个 FBG 传感器在同时受扰时, 定位报警信号难, 而无法实现对报警信号的有效识别和判断的问题, 可以利用一种基于经验模态分解 (EMD) 和小波包特征熵算法的分析方法来解决。我们首先对报警信号进行经验模态分解, 再结合小波包分解, 得到小波包系数提取其信号的能量分布; 其次做归一化得到信号的能量分布特征向量; 最后运用相关性分析, 以实现对报警信号的识别和判断。

实验证明, 结合经验模态分解和小波包特征熵算法能够有效解决 FBG 传感器的光纤围栏报警系统中同时受扰判断的定位报警问题。因此充分证明了, 利用这种方法对于解决光纤围栏报警系统中 FBG 传感器的级联判断报警信号是有效的。

从一般对光纤周界围栏的侵入与实验数据中, 我们得出了六种不同的入侵报警模式, 其典型的特征如图 5-26 所示, 前三种为地面入侵模式; 后三种为围栏入侵模式。

本系统首先从报警信号中提取其长度、极值、幅度、周期、均值、小波系数均值、信号波动、应变特征、峰值特征、冲击特征、振动特征等各种特征数据; 其次, 根据阈值单元判断信号含有哪些特征; 最后, 根据经验确定的隶属函数来分析判别这些特征, 并用特征组合的方法判断其为何种入侵模式的信号。

由上述介绍可知, 基于长距离准分布式 FBG 传感器的光纤围栏作为一种新型的安防监测系统, 不仅具有抗电磁干扰、抗腐蚀、易复用的特点, 而且具有技术成熟、成本较低、报警定位精确、可靠性高等优势, 在安防领域有着重要的应用前景, 也是目前智能安防监控的一种主流发展方向。

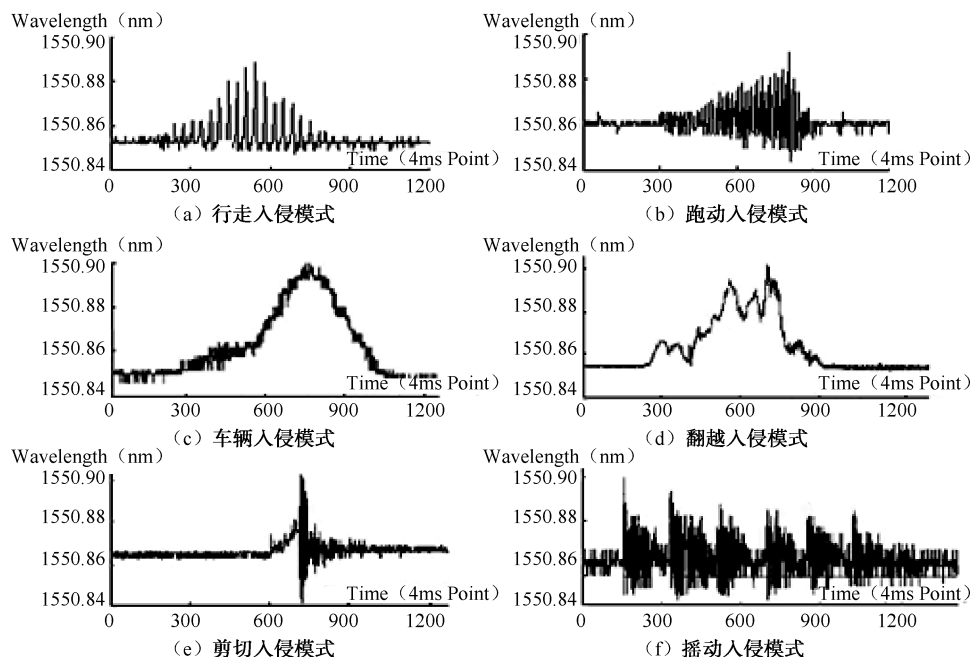


图 5-26 六种入侵模式

值得指出的是,为更加提高可靠性,本方案最后均经视频监控系统集成联动复核后,再驱动声光报警。因此,本方案的特点是,简单高效、安装便捷、方便用户、维护简单,且灵敏度还可以根据实际的安装环境变化而调整,稳定可靠。因此,在它转化定型生产后,将非常适合于大中小型的周界围栏布防用户的使用。

2. 组建火灾报警系统

(1) 一般的光纤光栅感温火灾探测系统。由式(5-22)可知,光纤布拉格光栅传感器的反射波长的变化与温度变化 ΔT 呈正比。因此,由反射波长的变化可以得到相应的温度变化量,此即利用光纤布拉格光栅探测温度的基本原理。

光纤布拉格光栅火灾监测报警系统主要由宽带光源、耦合器、FBG感温火灾探测器、波长解调系统、信号处理系统等组成,如图5-27所示。

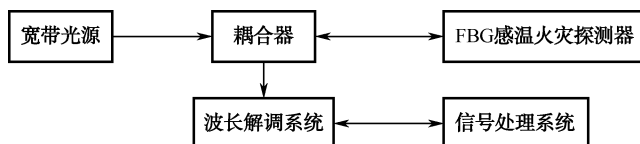


图 5-27 光纤布拉格光栅火灾监测报警系统

一般,图中的FBG感温火灾探测器,可以利用一个独立的光纤布拉格光栅或将多个温度特性完全相同的FBG串接在一根光纤中形成FBG感温火灾探测器,当宽带光源发出的光通过耦合器入射到用光纤串接的光纤光栅感温火灾探测器中时,利用多区波分复用技术,将每个被测对象的参量变化转换为光脉冲信号,受波长调制的反射光经耦合器通过传输光纤送入波长解调系统。该信号先通过光电探测器将光脉冲信号转换为电脉冲信号,并进行放大整形和线性化



处理,解调出被测参量,送入信号处理系统中处理而得出所检测的温度值。欲知图中系统核心的波长解调系统,详可参阅本书最后的参考文献[5]中的 10.3.5 节。

(2) 全同 FBG 多区波分复用的火灾监测报警系统。为实现多区波分复用,还需采用一种全同光纤光栅技术(即具有相同的中心波长,温度敏感特性一致的 FBG)。这种全同光纤光栅技术使感温探头的复用数量能根据现场实际需要确定,而不受光源带宽的影响。理论上,如不考虑光源能量的限制(比波长限制更易提高一些),全同光纤光栅的复用数量可以是无限多的。其另一个优点是,全同光纤光栅系统中只需要解调单一波长,因而其解调快速、方便。

为更进一步提高 FBG 火灾监测报警系统中 FBG 的复用数量,在 FBG 传感复用网络中,对某一个区域采用全同光纤光栅复用,而对另外的区域使用与上述全同光纤光栅不同的中心波长的光栅,即通过全同光纤光栅复用技术提高光纤光栅复用数量,再通过波分复用技术使此数量成倍增长。这种多区波分复用技术的 FBG 火灾监测报警系统如图 5-28 所示。

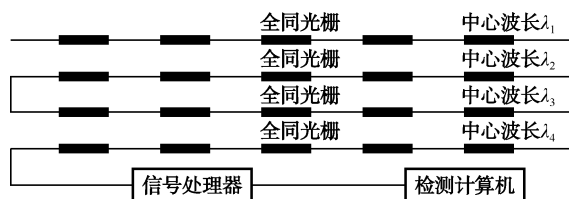


图 5-28 多区波分复用技术的 FBG 火灾监测报警系统

显然,解调时通过检测光栅波长,即能准确区分探测区域位置,并准确分辨 FBG 所在位置。这种全同光纤光栅复用技术与波分复用技术的混合运用,不仅克服了单路全同光纤光栅系统监测数据点单一而无法判断位置的缺点,同时也克服了波分复用技术复用光栅数太少的缺点,使同一根光纤上复用的光栅数成倍增长,并且能区分不同区域的温度和报警信号。

一个大型的火灾监测报警系统的网络拓扑架构如图 5-29 所示。

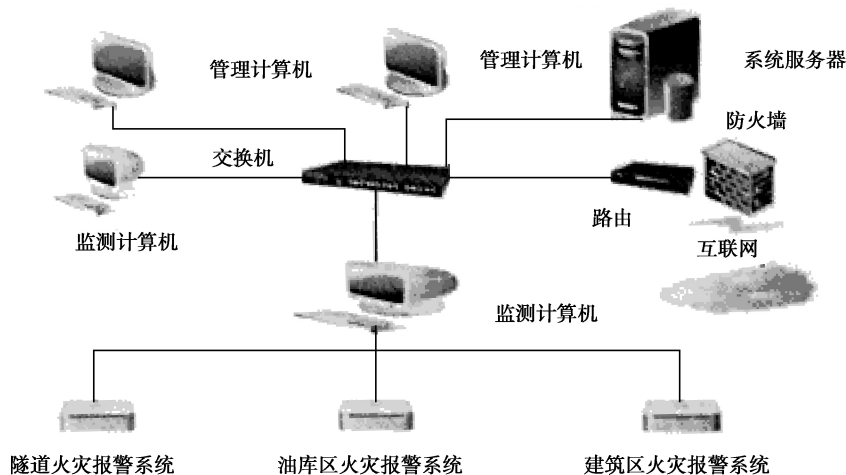


图 5-29 火灾监测报警系统的网络架构

由图 5-29 可知,整个系统由一些重点部位的 FBG 火灾报警系统、监测计算机、局域网、管理计算机、数据库服务器及网络等组成。其中,监测计算机负责信号的采集与处理;管理计算机作为人机界面负责信号的监测、报表、打印、显示,组成网络等功能;数据库服务器管理

信息数据库和实时监测数据库,并提供各种信息的查询。

由于星状拓扑具有容易进行重新配置,比较容易维护,能较好地处理传输媒介等优点,因而整个系统采用星状拓扑架构进行组网。管理计算机与监测计算机之间的通信协议采用 TCP/IP。监测中心网络由监测中心计算机与网络交换机组成。显然,网络交换机是中心与外场计算机进行通信的桥梁。

由上可知,这种 FBG 火灾探测新技术比传统的火灾探测技术具有稳定可靠、快速方便、易组成大型网络系统的特点,因而它必将会在安防市场获得广泛地应用。

光纤光栅感温火灾探测系统,都具有探测距离远、本质无源、安全防爆、使用寿命长等优点,是长距离火灾探测的理想选择,如用于隧道、电缆夹层等处火灾的探测等,所以,感温光纤在石油、煤矿等场所的火灾探测中运用广泛。而地铁的隧道区间的环境特点是灰尘多(而且是含铁成分高、容易导电的灰尘)、潮气重、电磁场干扰强、风速大,这种环境特点决定了地铁隧道不适宜采用传统的点式火灾探测器,而当采用线性感温探测器进行地铁隧道火灾报警时,光纤测温系统将比缆式线型定温探测器有更好的性能。所以,感温光纤在地铁区间火灾报警中有着广阔的应用前景。

3. 智能检测汽车超载

由前述可知,光纤布拉格(Bragg)光栅对特定波长的光具有反射作用,并且其反射中心波长随着应力、温度等物理量的变化而变化,因此利用光纤布拉格光栅的应变传感特性进行车辆超载测量,完全可克服汽车现行动态称重系统的缺陷。所以,能动态地智能检测汽车超载,以维护公路与桥梁的使用寿命,保障人民生命财产的安全,具有很大的社会意义和经济意义。

(1) 光纤 Bragg 光栅传感应力的工作原理。FBG 传感应力的工作原理如图 5-30 所示。当光栅受到外部应力的作用时,其栅距 Λ 随之发生变化,从而改变了后向反射光的波长。根据 $\Delta\lambda_B$ 变化的大小就可以确定待测部位相应物理量的变化。

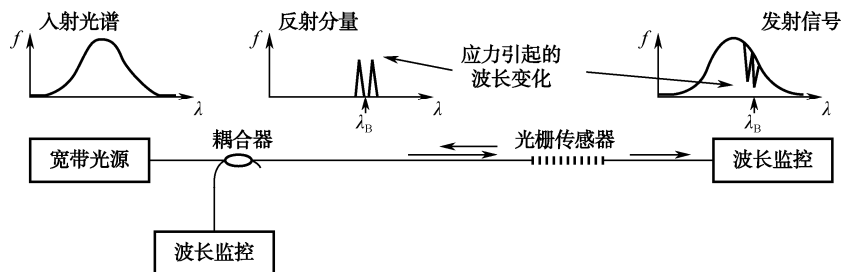


图 5-30 光纤布拉格光栅传感应力的原理

由前述公式(5-21)看出,反射波长的变化与应变成正比。也就是说,由反射波长的变化可以得到相应的应变力,因此用光纤布拉格光栅检测汽车重量,理论上是完全可行的。

(2) 动态检测汽车重量的光纤布拉格光栅传感系统。光纤布拉格光栅汽车重量传感器的纵向剖面图,如图 5-31 所示。其横向设置同样的光纤布拉格光栅 5 个,横向长度至少为大货车的宽度,即汽车通道宽。

由图可知,当行驶的汽车驶上光纤布拉格光栅汽车重量传感器时,车轮对钢板所造成的变形就通过支柱传给悬臂梁,致使其弯曲,从而导致光栅周期 Λ 的变化,并且光纤本身所具有的弹光效应,使得有效折射率也随着外界应力状态的变化而改变。因此,使光纤光栅的中心波长



λ_B 发生改变。如果事先对光纤光栅已进行过定标, 在车辆通过检测装置时, 光纤光栅的应力变化信号, 就会经传输光纤远距离地传输到监测室, 然后经波长解调, 由光电探测器转换为电信号后, 输入计算机处理系统, 从而就可以迅速地自动地给出该汽车的重量。

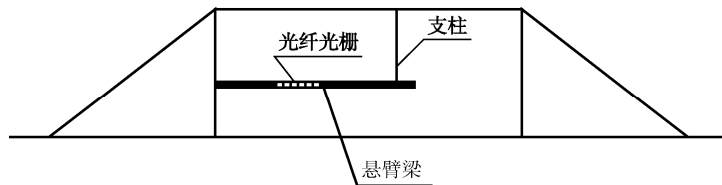


图 5-31 光纤布拉格光栅汽车重量传感器的纵向剖面图

实际上, 式 (5-20) 还可以转换为压力 F , 即

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon = KF \quad (5-24)$$

式中, K 为比例系数。式 (5-24) 说明, 光纤布拉格光栅反射波长的变化与压力成正比, 而比例系数 K , 可以通过特定使用条件和应用环境测试得出。因此, 只要测得光纤布拉格光栅反射波的中心波长的变化, 即可测得压力 F 。

设汽车通过光纤布拉格光栅汽车重量传感器的前轮的压力为 F_1 , 后轮通过的压力为 F_2 , 则可得到汽车的重量的表达式为

$$G = (F_1 + F_2) / g \quad (5-25)$$

式中, g 为重力加速度。当检测到汽车重量后, 检测口管理人员即可根据车型与车重判断该车是否超载; 如无人收费管理, 则需通过远、近景摄像机进行智能化检测, 通过远景摄像机视频检测出车型及大小, 并自动与数据库该类车的标准载重比较。当超载时, 现场与监控室立即声光报警, 近景摄像机识别并记下车牌号, 同时门禁关闭, 扬声器发出“车辆超载, 禁止通行, 靠边停下, 接受处理”的声音, 从而可杜绝因车辆超载引发的交通事故或损坏高速公路等等。显然, 这种传感器最好设在公路治安卡口或高速公路收费站口。

(3) 温度和应力的交叉敏感问题与实验仿真。值得提出的是, 除了应力外, 外界温度的变化也会引起光栅周期和导膜的有效折射率变化而引起中心波长的漂移, 这就是应力与温度的交叉敏感问题。为解决这一问题, 可通过引入一参考光纤光栅来解决, 即装有 5 个同样的光纤布拉格光栅的汽车重量传感器的最中间的 1 个光纤布拉格光栅就可作为参考光纤光栅。因为一般汽车的 2 个前轮可能各压 1 个光纤布拉格光栅, 2 个后轮可能一轮压在 2 个光纤布拉格光栅之间, 而正中间的光纤布拉格光栅没有车轮压而正好为参考光栅 (如果是三轮摩托车, 则两旁没车轮压的也是)。这 5 个光栅的中心波长变化情况均通过波长解调装置检测。当汽车通过汽车重量传感器的测量光栅之后, 温度和压力同时作用而使其中心波长发生漂移; 而参考光栅没有受到压力, 其中心波长的漂移仅来源于温度的变化。因此, 可根据检测光栅和参考光栅中心波长的变化情况, 就能有效地解决温度和应力的交叉敏感问题。

用实验装置做了实际检测与计算机仿真。数值模拟出车辆前后轮压过光纤布拉格光栅所引起的波长漂移情况, 如图 5-32 所示。图 5-32 (a) 为两个前轮经过检测口时引起光栅中心波长变化情况; 图 5-32 (b) 为两个后轮经过检测口时引起光栅中心波长变化情况; 图 5-32 (c) 为光栅没有受力时中心波长变化情况。

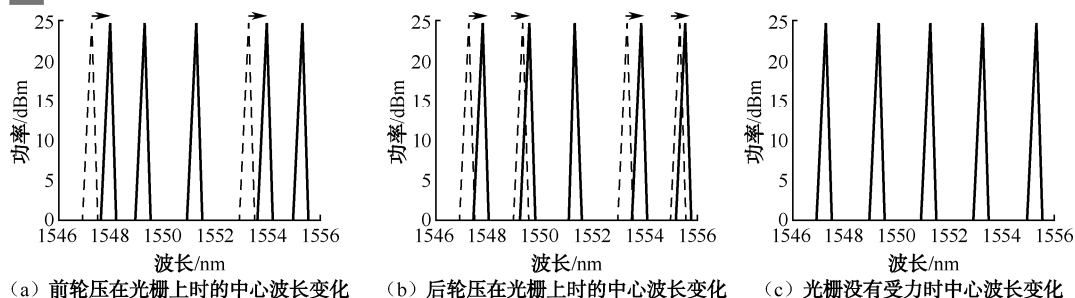


图 5-32 光纤布拉格光栅中心波长随压力变化情况

因此,实际上在汽车通过有光纤布拉格光栅汽车重量传感器的检测口时,共引起了 6 个中心波长的变化,因而通过与参考光栅的变化比较,滤去温度的影响,即可得出 6 个压力 $F_1+F_2+F_3+F_4+F_5+F_6$, 所以汽车的实际重量为

$$G=(F_1+F_2+F_3+F_4+F_5+F_6)/g \quad (5-26)$$

实验证明,当对 20 t 的货车进行测量时,其载货量超载 2%即可检测出来。

4. 可用于地震与地表骤变等的监测预报

在前述的光纤光栅传感器在地球动力学中的应用中,光纤光栅传感器则可应用在岩石变形、垂直震波的检测,以及作为地形检波器和光学地震仪使用等方面。因此,它可用于地震检测与地表骤变等现象的预测,光纤光栅传感器是能够实现远距离和密集排列复用传感的宽带、高网络化传感器,符合地震检测等的要求,因此它在地球动力学领域中无疑具有较大的潜在用途。有报道指出,光纤光栅传感器已成功检测了频率为 0.1~2 Hz,大小为 $10\sim 9\epsilon$ (应变) 的岩石和地表动态应变。

而火山区的应力和温度变化是目前为止能够揭示火山活动性及其关键活动范围演变的最有效手段。利用光纤光栅传感器,在较远的地方亦能进行监测。

5. 可用于航天器及船舶的监测预报

在前述的光纤光栅传感器在航天器及船舶的应用中,为了监测一架飞行器的应变、温度、振动、起落驾驶状态、超声波场和加速度情况,通常需要 100 多个传感器,故传感器的重量要尽量轻,尺寸尽量小,因此利用最灵巧的光纤光栅传感器是最好的选择。实际上,飞机的复合材料中存在两个方向的应变,嵌入材料中的光纤光栅传感器是实现多点多轴向应变和温度测量的理想智能元件。

为全面衡量船体的状况,需要了解其不同部位的变形力矩、剪切压力、甲板所受的冲击力,对于普通船体大约需要 100 个传感器,因此波长复用能力极强的光纤光栅传感器最适合于船体检测。光纤光栅传感系统可测量船体的弯曲应力,而且可测量海浪对湿甲板的冲击力。具有干涉探测性能的 16 路光纤光栅复用系统成功实现了在带宽为 5 kHz 范围内、分辨率小于 $10\text{ ng/Hz}^{1/2}$ 的动态应变测量。因此,光纤光栅传感器可用于航天器及船舶的监测预报。

6. 用于桥梁、矿井、隧道、大坝、建筑物等的维护和状况监测预报

在前述的光纤光栅传感器在民用工程结构中的应用中,力学参量的测量对于桥梁、矿井、隧道、大坝、建筑物等的维护和状况监测是非常重要的。通过测量上述结构的应变分布,可以



预知结构局部的载荷及状况。光纤光栅传感器可以贴在结构的表面或预先埋入结构中,对结构同时进行冲击检测、形状控制和振动阻尼检测等,以监视结构的缺陷情况。另外,多个光纤光栅传感器可以串接成一个传感网络,对结构进行准分布式检测,可以用计算机对传感信号进行远程控制。

光纤光栅传感器用于检测桥梁时,一组光纤光栅被粘于桥梁复合筋的表面,或在梁的表面开一个小凹槽,使光栅的裸纤芯部分嵌进凹槽得以保护。如果需要更加完善的保护,则最好是在建造桥时把光栅埋进复合筋,由于需要修正温度效应引起的应变,可使用应力和温度分开的传感臂,并在每一个梁上均安装这两个臂。

两个具有相同中心波长的光纤光栅代替法布里-珀罗干涉仪的反射镜,形成全光纤法布里-珀罗干涉仪(FFH),利用低相干性使干涉的相位噪声最小化,实现了高灵敏度的动态应变测量。用FFPI结合另外两个FBG,其中一个光栅用来测应变,另一个被保护起来,免受应力影响,以测量和修正温度效应,所以FFP~FBG实现了同时测量三个量:温度、静态应变、瞬时动态应变。这种方法兼有干涉仪的相干性和光纤布拉格光栅传感器的优点,已在5 mε的测量范围内,实现了小于1 με的静态应变测量精度、0.1℃的温度灵敏度和小于1 ne/Hz^{1/2}的动态应变灵敏度。

5.5.3 多路复用和分布式光纤传感器技术在安防中的应用

1. 基于拉曼散射的分布式光纤感温探测系统,可监测预报火灾

基于拉曼散射的光纤温度传感器所检测的物理量是后向拉曼散射光的光强。后向拉曼散射光的光强会随着检测光缆周围温度的变化而变化,从而能测知光缆周围的温度值。它利用的是拉曼散射产生的反斯托克斯线与斯托克斯线的光强比值,具体通过下式可将温度值计算出来。

$$R(T) = \frac{P_s(T)}{P_{as}(T)} = \left(\frac{\lambda_{as}}{\lambda_s} \right)^4 \exp\left(\frac{hcv}{kT} \right) \quad (5-27)$$

式中, $P_s(T)$ 为斯托克斯光强; $P_{as}(T)$ 为反斯托克斯光强; λ_s 为拉曼散射的斯托克斯线波长; λ_{as} 为拉曼散射的反斯托克斯线波长; h 为普朗克常量; c 为真空中的光速; ν 为拉曼频移波数; k 为玻尔兹曼常量; T 为检测温度。

从式(5-27)可以得出,只要测定了 $P_s(T)$ 和 $P_{as}(T)$ 的比值,就可以计算出温度 T 的值。基于拉曼散射的分布式光纤感温探测系统的工作过程,如图5-33所示。

半导体激光器发出的光脉冲通过耦合器到传感光纤里,经过温度调制的散射光通过耦合器进入到滤波器,滤波器分别滤出斯托克斯线和反斯托克斯线,再经过放大处理和A/D转换,然后将信号传入计算机进行信号处理,最终得出环境温度的检测值。

值得指出的是,由于斯托克斯线,特别是反斯托克斯线的信号非常微弱,所以探测信号会受发光光源稳定性、连接损耗、光缆缺陷、光缆位置的微小变动等因素的影响,从而影响检测结果的可靠性和精确性;而且,基于拉曼散射的光纤温度探测器在数据的处理过程中,一是要对时间求平均,二是要对空间求平均。因此,这种探测系统需要采用较复杂的信号处理手段,这就造成基于拉曼散射的探测系统对信号的响应时间较长。上述这两个问题,是设计这种火灾探测系统时,必须考虑的因素。

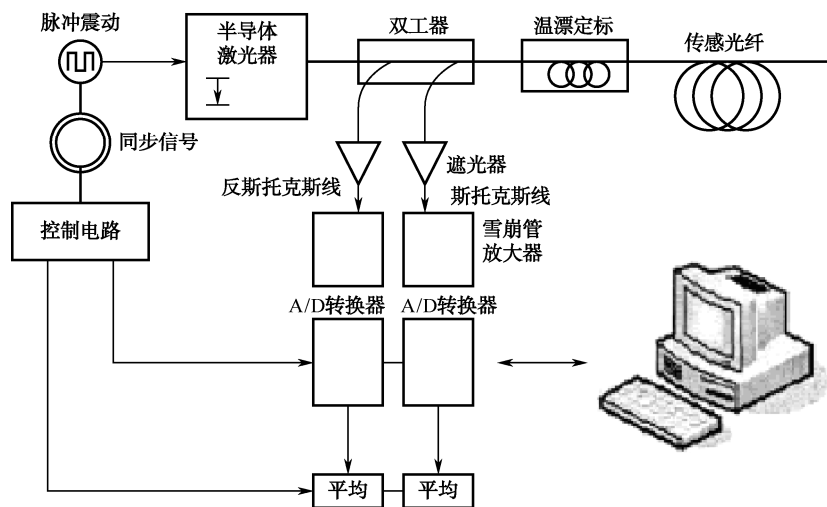


图 5-33 基于拉曼散射的分布式光纤感温探测系统的工作原理

2. 用于地震等灾害的监测预报

众所周知，自然灾害往往对人民的生命和财产带来极大的伤害，尤其地震灾害带来的损失使人防不胜防。因此，寻求对地震等自然灾害的预告，是摆在科技工作者面前的一项艰巨的任务。实际上，各种自然灾害发生前都是有各种征兆的，因而做到事前预告是可能的。

如前所述，光纤光栅传感器技术对温度和应力的探测是非常敏感的，它在测量桥梁和建筑物的应力变化方面的应用已获得成功，因此，完全可利用光纤光栅传感器技术，并加上作成多路复用和分布式光纤传感器技术，在每个地震监测站埋设起来，每天对其应力与温度等数据进行测量记录，当数据异常，并结合气候及一些动物等的异常反应，完全可证明是地震的前兆，即可发出地震预报。

5.5.4 光纤传感器在城市物联网智能安防中的应用

物联网技术现阶段应用已经十分广泛，利用各种技术对信息进行感知、传输、处理和反馈，其最大特征是感知的多样性、分散性、智能性和实时性。多样性表现为感知对象多、感知参数多、容量大；分散性即人与物、物与物通常比较分散；智能性是指需对数据进行分析 and 处理；实用性即能够实时感知、传输和处理信息。

光纤材料具有体积小、重量轻、牢固耐用、抗电磁干扰、传感头无需供电、使用安全、可远距离遥测、分布式等优点，和物联网的需求十分吻合。通过检测电波传输频率和变化来测量物体，可以用来做传感器。目前，光纤技术已经在物联网领域有广泛的应用，如海底观测网、地震、军事、交通等。

传感网络是由众多传感器节点组成的有线或无线通信网络，节点密集分布在所关注的物或事物的内部或周围，实现对物的连接、感知和监控。实际上，物联网就是将各种信息传感设备与互联网结合起来而形成的一个巨大网络。物联网中的传感网技术主要包括无线传感网和光纤传感网。由于通信网络通常要求传感器长时间工作在长距离、大温差、高压、强磁场或者更加恶劣的自然环境中，光纤传感器因其重量轻、灵敏度高、抗电磁干扰能力强、数据传输安全等



诸多优点,既能同时探测光波的多种参数变化又能提高信号传输的安全性和稳定性,具备无线传感网不具有的优势。因此,在物联网的发展中提出了“光纤物联网”,即光纤传感器与物联网技术融合而成为光纤传感物联网,也就是光纤传感与通信一体化网络。分布式光纤传感网因传输容量大、速度快,使光纤传感与通信一体化传输成为了现实。

总之,物联网与光纤传感有相辅相成、相互促进的作用。光纤同时具备宽带、大容量、远距离传输和可实现多参数、分布式、低能耗传感的显著优点。光纤传感可以不断汲取光纤通信的新技术(如新的半导体光源、新型光纤)、新器件,各种光纤传感器有望在物联网中得到广泛应用。光纤技术在物联网中有很广阔的应用前景,全光物联网有望在将来出现并成为一种新的物联网形式。

光纤传感器的应用范围很广,它在城市物联网智能安防系统中也有很多应用。如城市建设中桥梁、大坝、油田等的干涉陀螺仪和光栅压力传感器的应用。光纤传感器可预埋在混凝土、碳纤维增强塑料及各种复合材料中,用于测试应力松弛、施工应力和动荷载应力,从而评估桥梁短期施工阶段和长期营运状态的结构性能。

在电力系统,需要测定温度、电流等参数,如对高压变压器和大型电机的定子、转子内温度的检测等,由于电类传感器易受电磁场的干扰,无法在这类场合中使用,只能用光纤传感器。例如,分布式光纤温度传感器就是近几年发展起来的一种用于实时测量空间温度场分布的高新技术;又如,可用于易燃易爆物的生产过程与设备的温度测量。光纤传感器在本质上是防火防爆器件,它不需要采用隔爆措施,十分安全可靠。与电学传感器相比,既能降低成本又能提高灵敏度。此外,它还可以应用于铁路监控、火箭推进系统与油井检测等方面。

总之,光纤传感器目前可以直接或间接测量近百种物理量、化学量和生物量,下面再简单介绍一下它在城市物联网智能安防中的几个主要应用。

1. 在石油工业中的应用方案

在石油工业中,通常采用石油测井技术测量井下的温度、流量及压力等物理量,通过对各物理量的分析实时的监测井下情况,并对可能出现的各种问题提前做出预判。在测量各物理量时,需要克服恶劣的环境因素包括高温、高压、强腐蚀和电磁干扰等。对于传统的电子传感器来说,克服这些因素十分困难或者需要更多额外的成本和技术投入,而光纤传感器凭借自身的特点就可以克服这些极端环境,又因为光纤传感器能够实现分布测量,因此在石油测井技术中具有广阔的应用前景。

目前在石油测井技术中,可以利用光纤传感器实现井下石油流量、温度、压力和含水率等物理量的测量。现在较成熟的应用是采用非本征光纤 F-P 腔传感器测量井下的压力和温度。非本征光纤 F-P 腔传感器利用光的多光束干涉原理,当被测的温度或者压力发生变化时干涉条纹改变,光纤 F-P 腔的腔长也随之发生变化,通过计算腔长的变化实现温度和压力的测量,其方案的结构与工作原理,如图 5-34 所示。

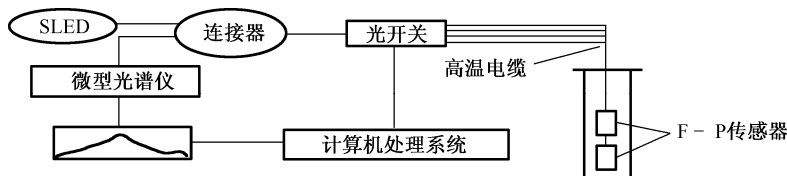


图 5-34 非本征 F-P 腔型光纤传感器系统结构与原理

由图可知, SLED 光源发出的光耦合到多模光纤中, 经耦合器和光纤传给传感头, F-P 腔置于被测环境中, 入射到 F-P 腔的信号经反射后再次通过光纤和耦合器传给微型光谱仪。计算机采集微型光谱仪的光谱经干涉解调计算出 F-P 腔的腔长, 最后通过标定确定其对应的温度和压力。

2. 在电力工业中的应用方案

在电力系统中, 为了能够及时发现系统可能出现的各种安全隐患, 需要采取有效措施对系统内的各条线路和网络进行实时监测以维持系统的安全运行。由于系统通常工作在高电压、大电流的情况下, 还有部分置于高空中, 这些因素都为系统的监测带来了不便。光纤传感器因其具有较强的抗电磁干扰能力和较宽的工作频率可以在电力系统中用于电流、电压、温度等参数的测量。

目前, 用分布式光纤传感器测量高压电力线的温度已在国外得到广泛应用, 在国内的研究也已经开始。在各种分布式光纤传感器中, 基于布里渊时域反射 (BOTDR) 的分布式光纤传感器是一个重要的发展方向, 其系统组成如图 5-35 所示。

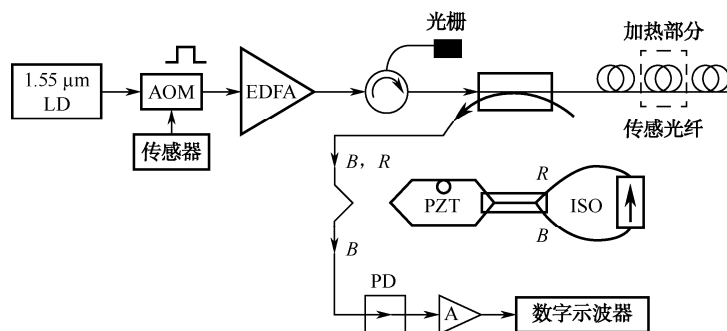


图 5-35 BOTDR 分布式光纤传感测量系统

由图可知, 光源 LD 发出的光经 AOM 调制成脉冲信号后被 EDFA 放大, 放大后的脉冲信号经光纤光栅滤波后耦合到传感光纤, 光纤的背向瑞利散射和布里渊散射经过耦合器输出到干涉仪, 布里渊散射信号被提取出来后, 经 PD 监测再被放大器放大后用数字示波器显示采集到的波形信号, 最后通过对波形的分析获得监测的参数变化。

由于我国各地环境差异较大, 在不同环境中光缆的性能也将受到不同程度的改变, 而瑞利散射光基本不受外界环境中温度和应力的影响, 这种基于 BOTDR 的分布式光纤传感器不能检测环境温度和应力对光纤性能的影响, 因此这种传感器的应用也受到了一定的限制。采用相干检测技术的 BOTDR 传感系统测量的是光纤的自发布里渊散射信号, 尽管其信号强度微弱, 但可以通过相干检测提高系统信噪比, 如图 5-36 所示。

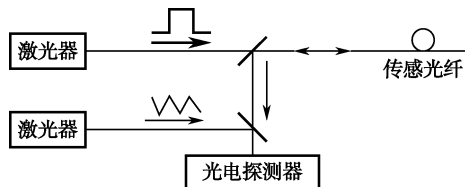


图 5-36 相干 BOTDR 传感测量系统

这种传感系统结构简单, 实现方便, 可以同时监测光纤断点、损耗、温度和应变等多个参数的变化。目前该系统已实现了距离 30 km 以上、温度分辨率 4℃、应变分辨率 100 μs、空间分辨率 20 m 的温度和应变的同时测量, 在只测量温度时, 测量距离可达 150 km。

值得指出的是, 电力工业中的设备大都处在强电磁场中, 电类传感器无法使用, 而光纤光



栅传感器在高电压和大电流中,具有高绝缘性和强抗电磁干扰的能力,因此特别适合在电力行业应用。用常规电流转换器、压电元件和光纤光栅组成的综合系统对大电流进行间接测量,电流转换器将电流转变成电压,电压变化使压电元件形变,形变大小由光纤光栅传感器测量。因此,封装于磁致伸缩材料的光纤光栅可测量磁场和电流,可用于检测电机和绝缘体之间的杂散磁场通量。

3. 在民用建筑工程结构中的应用方案

在民用建筑工程中,为确保工程质量和建设过程安全进行,通常需要在桥梁、大坝和楼宇的建设过程中采集多个监控点的数据信息,以此来分析当前工程的进行情况和可能出现的安全隐患。传统的测量方法一般采用表面贴片或者预埋钢弦式传感器实现监测点的应力、应变测试,由电阻应变片构成的贴片材料在混凝土中受基底材料和介质腐蚀的影响,会导致测量精度下降,且不利于分布监测和长期监测,钢弦式传感器的钢弦也会随时间的延长而损失测量精度,所以这些测试方法都不利于建筑工程的长期、精确观测。

光纤传感器以其轻巧耐用、灵敏度高、抗电磁干扰和可实现分布式检测等优点,更加适合建筑工程中的应力、应变检测。其中,光纤光栅传感器是最理想的灵敏元件。正如光纤光栅传感器在民用工程结构中所说,可以将它贴在结构的表面或预先埋入结构中,对结构同时进行冲击检测、形状控制和振动阻尼检测等,以监视结构的缺陷情况;并且,用多个光纤光栅传感器可以串接成一个传感网络,对结构进行准分布式检测,可以用计算机对传感信号进行远程控制。

用光纤光栅传感器检测桥梁的应用方案是,将一组光纤光栅黏于桥梁复合筋的表面,或在梁的表面开一个小凹槽,使光栅的裸纤芯部分嵌进凹槽得以保护。如果需要更加完善的保护,则最好在建造桥时把光栅埋进复合筋。由于需要修正温度效应引起的应变,可使用应力和温度分开的传感臂,并在每一个梁上均安装这两个臂。这样,即可对输出的数据予以修正,从而得到准确的应变值。

此外,还可利用两个具有相同中心波长的光纤光栅代替法布里-珀罗干涉仪的反射镜,形成全光纤法布里-珀罗干涉仪(FFH),利用低相干性使干涉的相位噪声最小化,从而可实现高灵敏度的动态应变测量。用FFPI结合另外两个FBG,其中一个光栅用来测应变,另一个被保护起来,免受应力影响,以测量和修正温度效应,所以FFP-FBG实现了同时测量三个量:温度、静态应变、瞬时动态应变。这种方法兼有干涉仪的相干性和光纤布拉格光栅传感器的优点。已用它在5 mε的测量范围内,实现了小于1 με的静态应变测量精度、0.1℃的温度灵敏度和小于1 ng/Hz^{1/2}的动态应变灵敏度。

南京大学工程管理学院张旭萃教授利用物联网的概念提出了“基于布里渊效应的连续分布式光纤传感技术”。利用连续分布式光纤传感器可以进行连续的分布式测量,24小时监测工程的“健康状况”,并且可以精确定位隐患位置。

4. 在军事安防上的应用方案

在空防领域中,目前已经可以采用光纤陀螺构成战术导弹的惯性测量元件,主要测量导弹运行过程中的俯仰角、偏航角和横滚角,从而准确命中目标。美国首先采用光纤陀螺制导技术,在伊拉克等战场上已取得了较好的效果。日本已将光纤陀螺用于无人机,控制飞机的姿态。光纤陀螺的组成与原理,如图5-37所示。

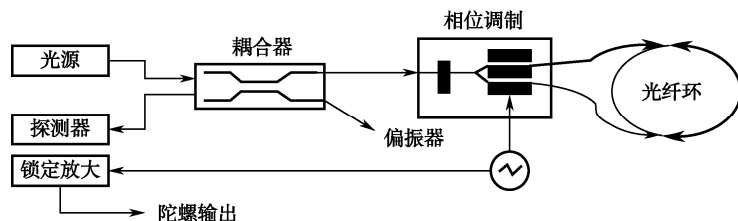


图 5-37 光纤陀螺的组成与原理

在海防领域中，光纤水听器是研究最早、发展最快的光纤传感器，由此构成的海防传感网络系统已开始用于海上边防和重要军事地区的海防警戒。光纤水听器的组成与工作原理，如图 5-38 所示。

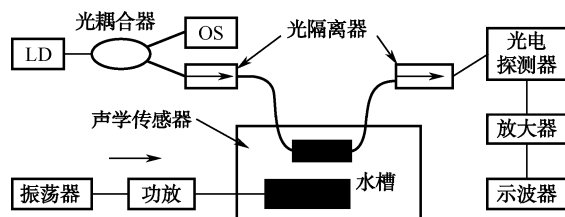


图 5-38 光纤水听器的组成与工作原理

近几年由光纤传感技术发展而来的光纤网络安全警戒系统在边防和重点区域防卫中也得到了应用。目前，一些发达国家正在使用的安全防卫系统就是由激光和分布式光纤传感网络组成的。本书参考文献[6]中的第 7 章就详细介绍了用于周界围栏的光纤传感技术。

除此之外，它在城市医疗系统、铁路监测、环保与灾害监测等方面都有应用，就不一一列举了。总之，传感器作为物联网采集信息的终端工具，它的发展直接影响着物联网的发展。随着物联网技术的不断进步，光纤传感器也将更多地应用到社会生活的各个角落，如果在光纤传感技术与物联网技术融合的基础上能够解决造价高、集成化和实用化困难等问题，它将具有更加广阔的应用前景。

光电信息传输技术及其在 安防中的应用

由于光纤通信主要是靠光纤光缆传输信息，尤其现在是网络化与信息化的时代，需要光纤光缆建立宽带信息网络。显然，城市等大范围的安防监控系统，也离不开光纤传输网络。因此，光纤传输技术是光电信息传输技术中最核心的技术。本章除首先论述光纤传输技术外，接着论述无线光波传输技术、太赫兹波传输技术、光信息调制传输技术，以及它们在安防中的应用。

6.1 光纤传输技术

在前述的光纤传感技术中，已介绍过光纤的结构、类型及其传光的原理。但在光纤通信的信息传输的实际应用中，多是将光纤作成光缆（Optical Fiber Cable）的形式，供工程应用。因此，在光纤传输技术中，必须再介绍光缆的结构及其连接与耦合技术，最后再介绍光纤传输系统的组成与特点，有关光纤传输系统本身的设计等，可参阅本书参考文献[1，2，5]。

6.1.1 光缆的结构及光纤的连接与耦合

1. 光缆的基本结构和分类

（1）光缆的基本结构。光缆一般由缆芯、加强元件和护层三部分组成。

① 缆芯：由单根或多根光纤芯线组成，有紧套和松套两种结构。紧套光纤有二层和三层结构。

② 加强元件：用于增强光缆敷设时可承受的负荷。一般是金属丝或非金属纤维。

③ 护层：具有阻燃、防潮、耐压、耐腐蚀等特性，主要是对已成缆的光纤芯线进行保护。根据敷设条件可由铝带/聚乙烯综合纵包带粘界外护层（LAP）、钢带（或钢丝）铠装和聚乙烯护层等组成。

显然，光缆是为了满足光学、机械或环境的性能规范而制造的，它是利用置于包覆护套中的一根或多根光纤作为传输媒质并可以单独或成组使用的通信线缆组件。一个四芯光缆剖面示意图，如图 6-1 所示，由图可见，光缆是由一定数量的光纤按照一定方式组成缆心，外包有护

套,有的还包覆外护层,用以实现光信号传输的一种通信线路,即由光纤(光传输载体)经过一定的工艺而形成的线缆。因此,光缆的基本结构实际是由缆芯、加强钢丝、填充物和护套等几部分组成,另外根据需要还有防水层、缓冲层、绝缘金属导线等构件。

一般,通信用光纤的外径一般为 $125\sim 140\ \mu\text{m}$ 。由于光纤裸纤很脆弱,它虽然有防护层的保护,但仍不适于长距离室外工程项目的架设。因此,在实际的工程应用中,光纤都是包在高抗拉强度的外套内,以光缆形式出现的。

目前,光缆一般具有两种最基本的类型,即用于室外的松管型(如图6-2所示)和用于室内的紧包缓冲型(如图6-3所示)。

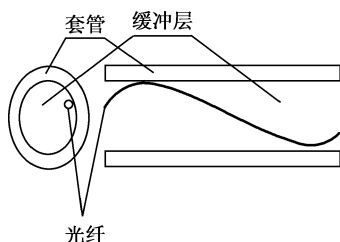


图 6-2 松管型光缆示意图

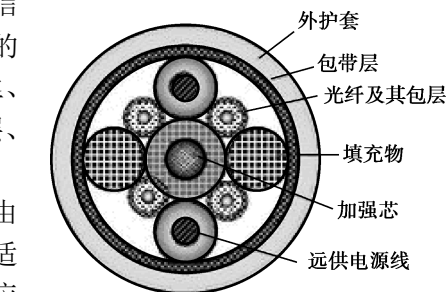


图 6-1 四芯光缆剖面示意图

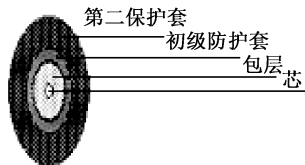


图 6-3 紧包缓冲型光缆示意图

在图6-2所示的松管型光缆内,填充有防潮用的软胶,每根管内最多可以装12根光纤。在实际的多光纤室外应用时,一般采用如图6-4所示的多光纤室外光缆。这种室外光缆除具有多层金属与非金属的保护套管外,在其中心均设置有一根抗拉钢丝,这就可以进一步提高光缆的抗拉强度。尤其是将这种光缆用于室外架空安装时,还必须按图6-5所示那样,去捆绑金属钢丝。

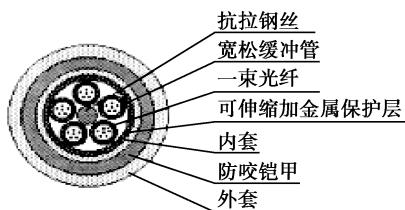


图 6-4 多光纤室外光缆

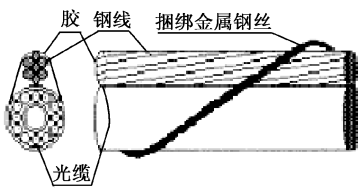


图 6-5 光缆在室外架空安装

(2) 光缆的分类。实际使用的光缆有按以下几种方法分类。

- 按所使用的光线分类: 单模光缆、多模光缆、(阶跃型、渐变型)。
- 按缆芯结构划分: 层绞式、骨架式、大束管式、带式、单元式。
- 按外护套结构分类: 无铠装、钢带铠装、钢丝铠装。
- 按光缆中有无金属分类: 有金属光缆、无金属光缆。
- 按维护方式分类: 充油光缆、充气光缆。
- 按敷设方式分类: 直埋光缆、管道光缆、架空光缆、水底光缆。

- 按适用范围分类：中继光缆、海底光缆、用户光缆、局内光缆、长途光缆。

2. 光纤的连接

光纤与光源或光电探测器耦合时，为了提高耦合效率，光纤端面应该抛光成镜面，且垂直于纤心轴线。进行这种光纤端面切割的简便方法是使用光纤切割刀具，如图 6-6 所示。将要切断的裸光纤顺着半径为 R 的（一般为几 cm）刚体放置，金刚石刀垂直光纤在光纤上压一伤痕，然后对光纤施一张力（拉紧光纤），伤痕产生的裂纹在弯曲应力和张力的作用下逐渐扩大，结果光纤就能平整如镜般地切断。切记不可用一般剪钳来切光纤，因为这样会因石英的脆性而断裂成高低不平的断面，从而无法使用。

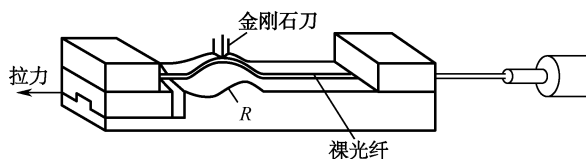


图 6-6 切断裸光纤的方法

目前，光纤的连接方式有永久性固定连接和活动连接两种。固定连接一般用于线路中光纤与光纤的连接。活动连接用于机器与线路以及需要经常拆装的连接。不管是哪一种连接方式，其主要要求是一样的，即应具有低的损耗。

（1）光纤永久性连接。永久性连接一般分为黏结剂连接和热熔接两种方式，如图 6-7 所示。这种连接都需要 V 形槽或精密套管，将光纤中心对准后加黏结剂使之固化，或者采用二氧化碳激光器或电弧放电等热熔光纤对接，使之连接起来。由于纤芯很细，其操作过程都是在显微镜下进行的。在单模光纤连接时，除要求光纤纤径一致之外，重要的是要求在实质上代表分布宽度的模场直径（Mode Field Diameter, MFD）要一致。

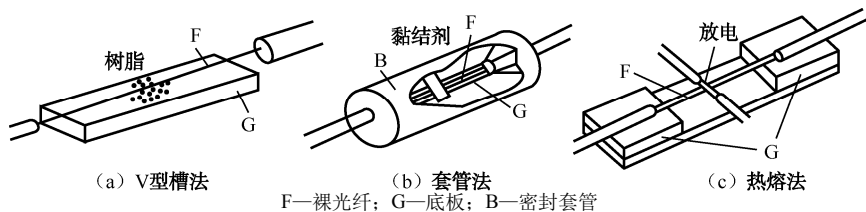


图 6-7 光纤永久性连接

连接焊点的好坏，直接决定连接的损耗。如焊接点的芯径失配、折射率分布失配、同心度不良及横向错位、轴向角偏差，以及端面的污染等，都可能使接点损耗增加。总之，不能出现图 6-8 所示的任何一种连接偏差。其中，图 6-8（a）、图 6-8（b）、图 6-8（f）和图 6-8（g）所示的连接偏差，对插入损耗影响最大。因此，固定焊接时，要求很高的几何精度和工艺水平。一般情况下，这种接头损耗可低至 0.1 dB 水平。

（2）光纤活动连接。活动连接主要用于仪器与线路，以及需要经常拆装的连接。光纤活动连接器的类型也很多，主要有单芯、双芯、多芯束状和单模、多模的光纤连接器等。若不考虑特殊设计，它们都包含有下列几个基本构件：插针体、用锁装置、后壳、压接套管和保护套。光纤活动连接器的外形如图 6-9 所示。

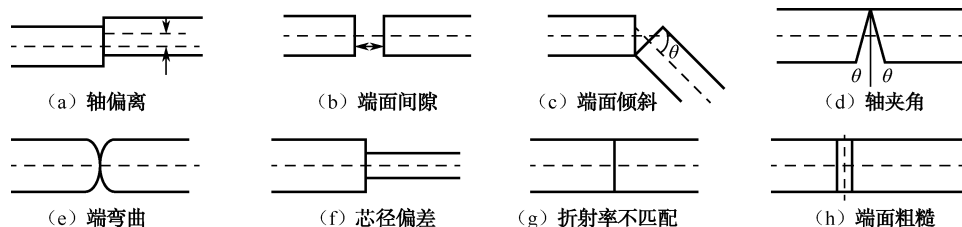


图 6-8 光纤连接可能出现的偏差

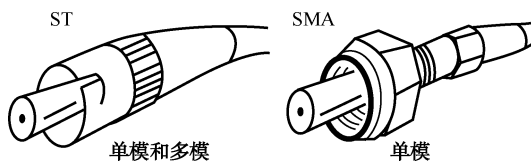


图 6-9 光纤连接器的外形

光纤活动连接器又分为多模连接器和单模连接器。多模连接器用于多模光纤系统，它有 U 形环路连接器、插座式连接器、现场装配连接器（FA）及 C 形连接器等几种；单模光纤连接器有直接接触型（PC 型）、平面对接型（FC 型）、矩形型（SC 型）及 ST 型等几种。一般地，活动连接的平均损耗在 0.25 ± 0.1 dB，最大损耗在 0.5 dB 左右。

为保证光纤连接器的光芯能够与光发射机及光接收机上接口座内的光芯部分平滑无缝地连接，必须对图 6-9 所示的光纤连接器的光芯截面进行磨光处理，以尽可能地减小光纤连接点处的插入损耗。而对光芯截面进行磨光处理的过程，需借助专用的光纤连接磨光机来完成。光纤连接磨光机可以精确地固定光纤连接器的光芯部分，使其与置于玻璃板上面的磨光薄膜保持严格的垂直关系。通过使其在磨光薄膜表面绕“8”字形的轨迹反复摩擦运动，即可将连接器的光芯截面打磨平滑。

3. 光纤的耦合

光纤的耦合，是把光源发出的光功率最大限度地输送进光纤中。这是一个比较复杂的问题，涉及光源发出的光功率的空间分布、光源发光面积、光纤的收光特性和传输特性等。

（1）直接耦合。就是把一根端面的光纤直接靠近光源发光面放置，如图 6-10 所示。

在光纤确定的情况下，耦合效率与光源种类关系密切。如果光源是半导体激光器，因其发光面积比光纤端面面积还小，只要光源与光纤面靠得足够近，激光所发出的光都能照射到光纤端面上。考虑到光源光束的发散角和光纤接收角的不匹配程度，一般耦合效率大约为 20%。

如果光源是发光二极管，情况更严重，因为发光二极管的发散角更大，其耦合效率基本上由光纤的收光角决定，即

$$\eta = P/P_0 = NA^2 \quad (6-1)$$

例如，当 $NA=0.14$ 时，则 $\eta=2\%$ 。为提高耦合效率，一种方法是在光源和光纤端面之间插入一块透镜，称为透镜耦合。

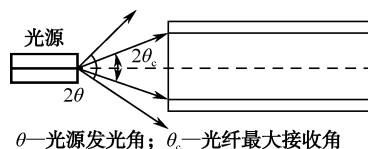


图 6-10 光纤与光源直接耦合



(2) 透镜耦合。由几何光学定理可知,对于朗伯型光源(如发光二极管),不管中间加什么样的系统,它的耦合效率不会超过一个极大值,即

$$\eta_{\max} = S_f / S_e \cdot \text{NA}^2 \quad (6-2)$$

式中, S_e 为发光面积; S_f 为光纤接收面积。式(6-2)表明,当 S_e 大于 S_f 时,加任何光学系统都没有用,最大的耦合效率可以用直接耦合的办法得到。当 S_e 小于 S_f 时,加上光学系统是有用的,可以提高耦合效率,而且发光面积越小,耦合效率提高越多,在这个准则下,有如下一些透镜耦合方式。

① 光纤端面球透镜耦合 加透镜最简单的方法是将光纤端面做成一个半球形,使它起到短焦距透镜作用,如图 6-11 所示。

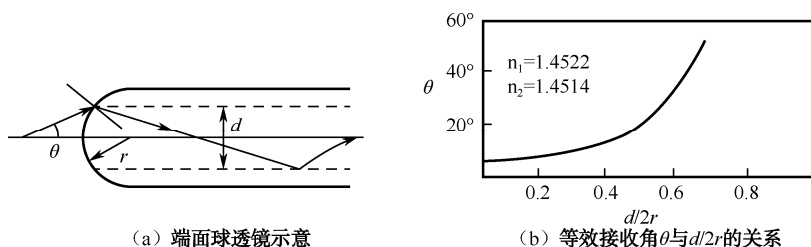


图 6-11 端面球透镜耦合

由图 6-11 可见,端面球透镜的作用是提高光纤的等效收光角,因而使耦合效率提高。这种耦合方法对突变型光纤效果很好,对折射率渐变型光纤则差一些。

② 圆柱透镜耦合 半导体激光器所发出的光在空间是不对称的,在平行于 PN 结方向上光束比较集中(2θ 为 $5^\circ \sim 6^\circ$),在垂直于 PN 结方向上发散较大(2θ 为 $40^\circ \sim 60^\circ$),所以直接耦合时效率不高。利用圆柱透镜可使耦合效率有很大的提高,其装置如图 6-12 所示。

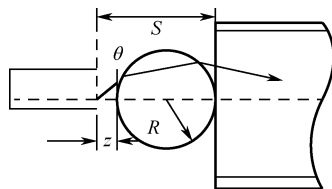


图 6-12 圆柱透镜耦合

详细研究表明,当柱透镜半径 R 与光纤半径相同,激光器位于光轴上,且镜面位于 $z=0.3R$ 时,可得到最大的耦合效率,大约为 50%;如果激光器的位置在轴向上有偏离,则耦合效率明显下降。说明这种耦合方式对激光器、圆柱透镜及光纤的相对位置的精确性要求很高。

③ 凸透镜耦合。将光源放在凸透镜的焦点上,使光变成平行光,然后再用另一个凸透镜将此平行光聚焦到光纤端面上,如图 6-13 所示。

这种耦合器由两部分组成,每一部分各含一个凸透镜。因为是平行光,连接部分要求不高,调整、组装等都比较容易,使用比较方便。但其耦合效率一般仅在 5% 左右。

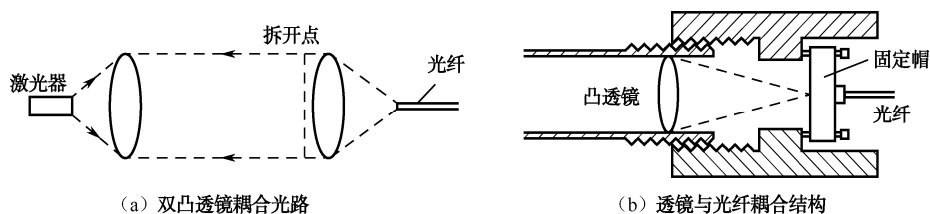


图 6-13 凸透镜耦合图

④ 自聚焦光纤 用一段长为 $L_{T/4}$ 的自聚焦光纤代替图 6-13 (b) 中的凸透镜, 也可构成耦合器, 一般是将光纤与自聚焦透镜胶合在一起, 平行光进入自聚焦透镜, 经聚焦全部进入光纤, 如图 6-14 所示。这种耦合形式结构紧凑, 稳定可靠, 是较好的耦合形式。其耦合效率一般为 50% 左右。

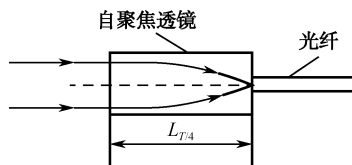


图 6-14 自聚焦透镜耦合

⑤ 圆锥形透镜耦合 将光纤前端用腐蚀的办法做成如图 6-15 (a) 所示的逐渐缩小的圆锥形, 或者用烧熔拉细的办法做成如图 6-15 (b) 所示的圆锥形, 前端半径为 a_1 , 光纤自身半径为 a_n , 当光从前端以 θ'_c 角入射进光纤, 经折射后以 γ_1 角射向界面 A 点, 如图 6-15 (c) 所示。因界面为斜面, 所以 $\gamma_2 < \gamma_1$, 如果锥面坡度不大, 其近似关系为

$$\sin \gamma_{n-1} / \sin \gamma_n = a_n / a_{n-1} \quad (6-3)$$

可以证明, 有圆锥时光纤的接收角 θ'_c 与端面光纤的接收角 θ_c 之间的关系为

$$\sin \theta'_c / \sin \theta_c = a_n / a_1 \quad (6-4)$$

式 (6-4) 表明, 有圆锥透镜的光纤的数值孔径是平端光纤的 a_n / a_1 倍, 只要前端面直径 $2a_1$ 比光源面积大, 这种耦合效率可高达 90% 以上。

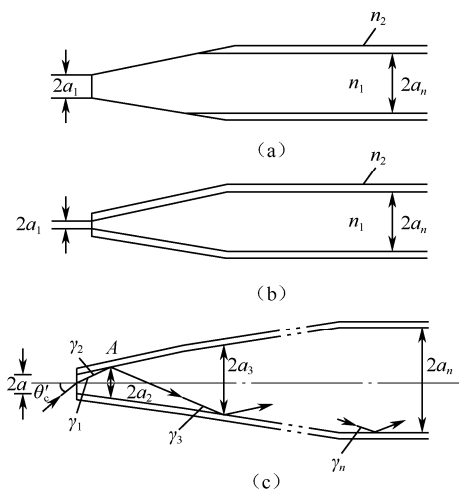


图 6-15 圆锥形透镜耦合

(3) 光纤全息耦合。由于光纤全息片可以将光的波前互相变换, 因此可以用来作为一种光纤耦合器。全息耦合器的制法如图 6-16 (a) 所示, 经光纤的发散光束作为物光束, 直射光束作为参考光束, 用重铬酸明胶或乳化银照相胶片作为全息记录介质。这个全息片就是一个光纤耦合器, 如图 6-16 (b) 所示, 使用时, 要求与记录全息图时的参考光相共轭的激光束照射, 会聚光束被再现, 并耦合进光纤中去。原则上讲, 这种耦合方法的耦合效率是非常高的。而实际上由于全息片的衰减, 这种耦合方式的实际耦合效率与透镜相比并不优越。不过, 它的最大优点是, 可以作为多功能的光学元件来应用。

6.1.2 光纤传输系统的组成与特点

大家知道, 利用光纤传输光信号实现光通信, 是光纤光缆传输线最主要的应用。光纤可用

于传输电话、电视,可用于计算机连网,可组成单位群落的通信网络等,尤其是在传输高质量的视频图像,且不希望图像质量有任何降低的远距离传输时,通常采用光纤传输系统。

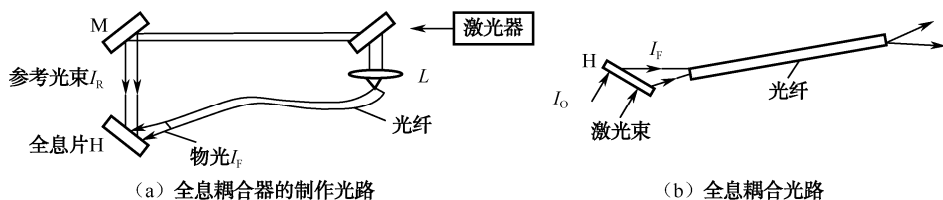


图 6-16 光纤全息耦合

1. 光纤传输系统的组成与原理

在光纤传输系统中,实际上光只是载波。由电磁波谱可知,光的频率比无线电信号的频率要高几个数量级(约 1000 倍以上)。而我们知道,载波频率越高,可以调制到电缆上去的信号带宽也就越宽。由于光纤的带宽实在是太宽了,许多光发射机和光接收机都能够把很多路电视图像信号连同控制信号、双向音频信号一起调制到同一根光纤上去。

在视频监控中使用光纤传输系统时,系统的图像质量只受限于摄像机、环境和监视器这三个因素。而光纤传输系统可以将图像画面传送到非常远的地方(一般几千米远),都不会使信号发生任何形式的畸变,更不会减损图像画面的清晰度或细节。视频监控的光纤传输系统的基本组成原理如图 6-17 所示。实际上,光纤传输系统主要由光发射端机、光纤光缆传输线、光接收端机及耦合器与连接器(两者图中未标明)组成。

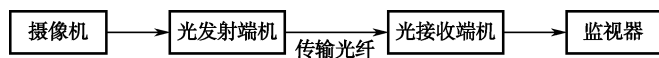


图 6-17 视频监控光纤传输系统的组成原理

光纤传输系统的工作过程是:光发射端机主要将待输出的电信号经信号处理放大后,去调制光源,产生相应的光信号(图中是将摄像机输出的视频电信号转换为光信号),然后通过耦合器将信号光束送入光纤内;该调制光信号经光纤光缆的长距离传输,被一个光接收端机接收,即将信号光束送入光电探测器,将光信号转换为电信号进行解调等处理后输出(图中是解调出所传送的视频电信号,供监视器显示),从而完成光纤传输信息的全过程。值得指出的是,图中摄像机是通过一小段同轴电缆连接到光发射端机的,光接收端机也是通过一小段同轴电缆连接到监视器的,而光发射端机与光接收端机的光纤光缆间的对接,则要通过专门的光纤连接器进行。

一般,光发射端机的光源大多采用半导体光源或半导体激光器。例如,用砷化镓发光二极管和激光器,其发光波长为 $0.8\sim 0.9\ \mu\text{m}$;如用掺钕钇铝石榴石激光器,其发光波长为 $1\sim 1.1\ \mu\text{m}$;如用砷镓铟半导体激光器,其发光波长为 $0.87\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 等。而光接收端机中的光电探测器要求具有灵敏度高、响应快、噪声低的特点,因而常用 PIN 型光电二极管或 APD 型(雪崩)光电二极管等。值得提出的是,应注意光源、传输光纤和光电探测器三者间的光谱匹配,因为这对系统的工作特性有着很大的影响。

光纤传输的信息既可以是模拟量,也可以是数字量,依具体要求而定。光纤传输通信的最大优点是通信容量大,其带宽可达 300 THz;光纤的线径细、质量轻,因此可节省材料,如

1 kg 纯玻璃可拉制单模光纤达几千千米,拉制多模光纤也可达上百千米,而 100 km 的 1 800 路同轴通信电缆约需铜 12 t 和铅 50 t。由此可见,采用光纤可大量节省金属,而制造光纤的硅材料却在地球上取之不尽。此外,它在光纤通信中损耗也比较低,为 1~0.4 dB/km。

2. 光纤传输系统的特点

与铜线和同轴电缆等传输系统相比,光纤传输系统具有下列明显的优势。

(1) 当长距离传输时,光纤传输系统的保真度和画面清晰度比电线或电缆传输系统要高得多。

(2) 光纤不受电磁辐射与雷击等任何电气干扰的影响,并且光纤是绝缘体,它可与高压电气设备或电力线接触,而不会导致任何问题。

(3) 光纤不存在接地回路问题,也不存在交扰横条、图像撕扯等问题。

(4) 在对光纤进行维护时,不须将发射端机与接收端机断电。

(5) 光纤传输非常安全、很难窃听,并能很容易发现有没有人正在企图窃听。

(6) 光纤不会生锈或腐蚀,大部分化学品对玻璃纤维都不会造成不良影响,因此在那些不能使用铜线的地区,可以使用光纤。直埋式光纤可以埋到各种土壤中,或暴露在腐蚀性的大气中(如室外或化工厂内)。

(7) 光纤没有起火的危险,即使在火灾风险非常高的天气中,也不会对设备和设施构成威胁。

(8) 光纤几乎不受天气条件的影响,因此光缆可以铺设到地面或架设到电线杆上,并且光缆比标准的电气线缆、同轴电缆要结实得多,如使用得法,它能耐受风荷载和冰荷载带来的应力。

(9) 光纤传送视频信号的损耗小、效率高,并且不需要中继器(放大器),所以设备可靠性高、容易维护,是理想的远距离传输设备。

(10) 不论是单模光纤还是多模光纤,光缆总比同轴电缆细、轻得多,因而在搬动、安装和使用时都容易得多。一般普通光缆每千米的质量是 3.6 kg,外径仅为 4 mm;而普通同轴电缆每千米的质量为 150 kg,直径约为 10.4 mm。

在对光纤传输系统进行选择评估时,用户不应单单考虑设备本身的投资,而光纤的柔性及较小的体积和质量等优点,往往可以弥补目前价格方面的劣势。只要想一想光纤传输系统能够预防多少无法预见的问题(如其特点所示),就可以发现目前光纤传输系统价格高也是物有所值的。因此,在需要传输高质量的图像画面时,应当把它作为首选的传输手段。

6.2 无线光波传输技术

当实际应用现场环境的限制而无法用有线传输设备时,就需要使用无线传输设备。根据使用频率不同,无线传输可分为

(1) 无线电波传输,如分米波传输、微波传输(地面式或卫星式)。

(2) 无线光波传输,如使用红外光束的光波传输。

通常,有线传输系统的传输效果一般都是可预期的,而无线传输设备的传输效果则无法预期。这是因为无线信号和光波信号通过的空气和其他介质的变化不定,以及不同波长信号的传

输特性千变万化所致。本节这里仅介绍无线光波传输，目前主要是红外光波传输。

6.2.1 无线光波传输系统的组成原理及特点

无线光波传输或无线光通信，又称为自由空间光（Free Space Optical, FSO）通信，是一种无须光纤的新型的宽带接入技术。它是在空气介质中用激光或光脉冲在红外光谱范围内传输，提供无线高速的点对点或点对多点的连接。但红外光波传输的光波信号受天气条件的影响非常大，会被不透明的物体完全挡住。因此，它们在雾天和雨天的有效传输距离，远远短于在可见度好的天气中的传输距离。一般在红外传输系统中，我们不希望发射机和接收机之间有任何障碍物。但红外光束可以经过一次或几次镜面反射，以绕过弯角。红外传输系统与射频和微波系统相比，具有保密性好（红外光束很窄，不易窃听）和带宽高等优点。由于红外传输系统的带宽较高，因而可同时传输多路信号。

目前市场上无线光通信产品最大支持 2.5 Gb/s 的高带宽传输率，用以传输数据、声音和图像，最大传输距离为 4 km。无线光波传输系统有如无线微波传输系统般的快速安装性，并且传输安全和不需要频率执照。因此，作为一种新的“宽带”选择，无线光波传输技术在国外已经开始得到日益广泛的应用。

1. 无线光波传输系统的组成及工作原理

同光纤传输系统一样，无线光波传输系统也由光发送端机和光接收端机组成。因此，无线光波传输系统中使用的发射机和接收机与光纤传输系统中的设备非常类似。不同之处主要是所用设备内部的光学构件。

发射机的光学构件必须将 LED/LD 发出的光线尽可能多地传送到镜头和大气中去。也就是说，要根据 LED 和 LD 的不同需要产生具有特定发散角的光束。接收机的镜片则做得尽可能大（直径约为几 cm），以接收到尽可能多的光线，尽量增大系统的信噪比。

无线光波传输系统的组成及原理如图 6-18 所示，由图可见，为提供全双工能力，每一个无线光波传输系统或 FSO 系统均含有光发射机与光接收机。用数据、声音或图像信号，经调制驱动光发射器件 LED 或 LD，并经透镜以较窄的发散角，将调制的红外光束发射到大气中。当光接收机镜头与光电探测器件（一般为 PIN 光敏二极管或 APD 雪崩光敏二极管）接收到这种红外光束后，经低噪声放大、最后由解调器解调出所传输的数据、声音或图像信号来。

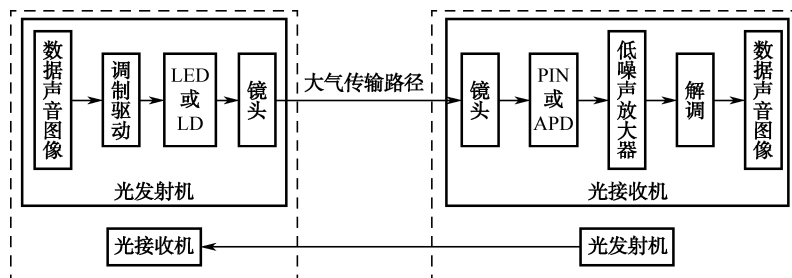


图 6-18 无线光波传输系统的组成及原理

通常，短距离传输可以使用 LED 作为光源。在较远的传输距离（如几 km）下，要获得较好的传输效果，则必须使用半导体激光器 LD，所以，LED 可用于短距离、低容量或模拟系统，

其成本低、可靠性高；而 LD 适用于长距离、高速率的系统。

LED 系统的造价较低，光束一般比较宽，为 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ，因此发射机和接收机之间的校准比较简单；LD 发射机的束宽为 $0.1^{\circ} \sim 0.2^{\circ}$ ，其发射机和接收机之间的校准就比较困难。为了一直保持校准，对安装支架的稳定性要求比较高。为保证接收机能收到良好、稳定的信号，红外光发射机和接收机都必须稳固可靠地安装在建筑构件上，并且还要求这种建筑构件不能摇摆、晃动或震动，也不能由于热量不均衡而发生明显的扭转。

LED 和 LD 的发光系统的光束一般都能穿过各种透明玻璃窗。但如果玻璃上面的镀膜颜色较深，则信号强度将会受到严重影响，并使最终收到的图像的质量变得非常差。光束到底能不能穿过特定的窗户，实际只要做一个简单的测试就可以确定。因为许多系统都要求红外光束能够透过窗玻璃传送到街对面的房间去，所以我们在设计和安装这类红外系统前，就必须要先进行这种测试。用 LD 的主要好处是，它的传输距离较长，而且传送视频、音频和控制信号时的安全度较高。LD 传输系统很难窃听，这是因为窃听用的设备即激光接收机必须放到光束路径上，这样做比较难，即使对上了也很容易被发现。

需要注意的是，在室外使用时，要为发射机配备带加热器、风扇和雨刷的全天候防护罩，以使其工作在正常范围内。无线光波传输系统网络主要有三种拓扑结构：点到点、点到多点（星状）和网状结构，也可以把它们组合起来使用。

2. 无线光波传输系统的特点

无线光波传输技术是一种使用人眼看不见的红外光束在空气中的技术，具有以下的特点。

（1）施工、安装快速，且稳定性好。由于无线光波传输技术只需进行屋顶天线安装等简单的布设，无须埋设光纤或有线电缆，因而使施工周期大大缩减，通常只需几小时便可以完工，并且它主要采用模拟传输方式，并不像蓝牙、RF 无线射频等技术采用数字信号传输，几乎没有任何相似的信号对它产生干扰，因此，它能以最短的时间提供稳定、高速、高质量的服务，从而深受电信与监控工程商的青睐。

（2）拥有光纤传输的性能，不受各种无线电设备及电气噪声的干扰。在理论上，无线光波的传输带宽与光纤的传输带宽相同。只是光纤传输中之光信号在光纤介质中传输，而无线光波传输的光信号是在空气介质中传输而已。因此，有人把无线光波传输技术称为“虚拟光纤”传输技术。由于同样都是传输光信号，所以就不受无线电设备及电气噪声的干扰。

（3）不需要申请频率执照，因而不存在频率管制及频带分配的限制。使用微波无线通信，需要申请频率执照。而无线光波传输系统或光通信产品则不需要申请频率使用权。因为这些设备基本上都工作于红外频带，该频带有相当丰富的频谱资源，而且在全世界范围内均不受管制。显然这为无线光波传输技术的灵活应用提供了有利的条件。

（4）传输安全、可靠、保密性好。由于光波传输的波束很窄，又是不可见的红外光波，因而很难在空中发现一条线路。同时，这些红外波束又非常定向，它是对准某一光接收机的，若想截接，就需要用另一部光接收机在视距内对准发射机，而且还需知道如何接收信号，显然这是很难做到的。如果光信号被截获时，接收端的信号减弱后会立即触发报警。相比之下，微波无线通信会被窃听，即使在加上 WEP (Wried Equivalent Privacy) 协议后，在它提高安全性的同时却牺牲了近一半的传输率，所以无线光波传输技术安全可靠、保密性好。

在日常生活中，红外传输技术随处可见，最典型的莫过于电视机、空调等通过红外遥控器



进行控制。随着科技的进步,大众生活水平的不断提高,人们对家居智能化的要求也越来越高,诸如灯光控制、背景音乐、安防报警等方面也逐渐开始转向智能化控制。正因为如此,红外传输具有很强的私密性,例如我们在自己家使用红外遥控器时,邻居家的电器是不会受到控制影响的。

(5) 最适用于有自然或人工障碍的地区。一般,光纤、线缆不适用于跨越有河流、铁路、高速公路或沼泽等地区,但使用无线光波传输技术即可。

(6) 不依赖于任何协议,且成本低廉。无线光波传输系统产品作为一种物理层的传输设备,是可以不依赖于任何协议的,并且红外传输技术已非常成熟,上下游产业链也极为发达,相对于蓝牙、Wi-Fi 等无线传输技术,在成本上也有明显优势。

虽然红外传输技术还存在着如传输距离短、通信角度小等一些缺陷,但前面几项优点让其始终具备着一定的竞争力。不仅家电厂商始终对红外传输不离不弃,目前在现今的智能家居领域也得到了广泛的应用。

6.2.2 无线光波传输技术的难点及其解决法

虽然,无线光波传输技术有前述的优点,但在技术上还有几个应注意解决的难点问题。

(1) 传输距离与信号质量的矛盾。由于无线光波传输技术是一种视距宽带通信技术,因而其传输距离与信号质量的矛盾非常突出。一般,当传输距离超过一定时(现最远只能达 4 km),其波束就会变宽,难以被接收机正确接收。

当前,只有在 1 km 以下才能获得最佳的效果和质量,多种因素影响其达到 99.999% 的稳定性。

(2) 在空气中传输的质量受天气的影响较大。由于无线光波传输技术是在空气介质中传输,其传输质量受天气的影响较大。一般地,晴天对传输质量的影响最小,而雨、雪和雾天对传输质量的影响较大。经测试,无线光波传输受天气影响的衰减经验值为:晴天 5~15 dB/km、雨天 20~50 dB/km、雪天 50~150 dB/km、雾天 50~300 dB/km。

目前解决这个问题,一般采用更高功率的 LD 管、更先进的光学器件和多光束。

(3) 城市内高层建筑物的阻隔、晃动的影响。无线光波传输技术在城市内应用,受高层建筑物的阻隔、晃动而影响两个点之间的激光对准。因为对无线光波传输系统来说,光链路两端的对准(即捕获)和保持(即跟踪)至关重要。

国外一些公司多采用全球卫星定位系统(GPS)来连续进行监测和调整发射机和接收机的位置,从而使调校费用增高。而国内清华同方首次创新地将一种光学器件应用在无线光波传输系统产品中,并加以自主专利技术的控制算法和 DSP 信息处理技术,大大提高了系统的灵敏度。在无须 GPS 的帮助下,只用短短的几秒就能完成初始链路连接。无论是建筑物晃动还是其他外力因素干扰,都能自动跟踪、保持通信,在任何干扰下只要几 ms 就能重新对准。

(4) 激光的安全影响了使用。为解决天气对光波传输质量的影响,往往加大激光二极管的功率。但超过一定功率电平的激光,对人眼可能会产生影响,因此人体可能被激光系统释放的能量伤害,所以激光功率不能无限制地加大。

6.3 太赫兹波传输技术

自1960年激光问世以来,科学家一直对超短激光脉冲、超快过程及超快现象展开了研究,经过30多年的不懈努力,已取得了很大的进展,现利用克尔透镜锁模钛宝石激光器可产生短至5 fs的激光脉冲。这种超短激光脉冲,已在物理、化学、生物、医学、工业及军事领域有着广泛而现实的应用。除了激光脉冲,人们发现,最早从核爆炸产生的强电磁脉冲(脉宽在ns量级)对电子设备有极强的破坏力,由此引发了科学家对超短电磁脉冲的研究。在该领域中,太赫兹电磁脉冲的产生技术及应用受到了人们极大的关注。这是因为太赫兹电磁脉冲正是由超短激光脉冲选通半导体光导开关后产生的;另一原因是太赫兹电磁脉冲在很多基础研究、工业应用及军事领域有相当重要的应用。因此,世界上很多先进国家的研究机构,都相继开展了对太赫兹技术的研究,目前已取得了很多重要成果。

6.3.1 太赫兹波的产生

所谓太赫兹($\text{THz}=10^{12}\text{ Hz}$)波是指频率在 $0.1\sim 10\text{ THz}$ (波长为 $30\text{ }\mu\text{m}\sim 3\text{ mm}$)之间的电磁波,它在电磁波谱上位于微波和红外线之间,其频率范围是处于电子学和光子学的交叉区域。在20世纪80年代中期以前,由于缺乏有效的产生方法和检测手段,科学家对该波段电磁辐射性质的了解非常有限,是电磁波谱中唯一没有获得较全面研究并很好加以利用的最后一个波谱区间,是人类目前尚未完全开发的电磁波谱“空隙”区。

近十几年,伴随着一系列的新技术、新材料的发展和应用,尤其是超快激光技术的发展,为太赫兹波脉冲的产生提供了稳定可靠的激发光源,从而极大地促进了对太赫兹辐射的机理、检测、成像和应用技术的研究和发展。在科学上曾被称为“太赫兹空白”的这一波段,已经迅速成为一门新的极具活力的前沿领域。

由国内外的研发成果表明,太赫兹技术在物理、化学、材料、生物、医学、信息、通信、国家安全等领域,具有重大的科学价值和广阔的应用前景,尤其可在安防领域大显身手。

由于太赫兹波频率对应的热能等价于 $3\sim 100\text{ K}$ 的温度范围,这将产生两个重要结果:一是室温物体以及有机活体在某种程度上能够发出太赫兹辐射,这一特性已被用于无源太赫兹波成像(尽管需要复杂的探测器);二是有望直接发射太赫兹波的远红外量子级联(QC)二极管激光器,必须抵消激光上能级的热致粒子数分布,因此,量子级联二极管激光器,通常在低温下工作,且其发射频率不会低于 2 THz (尽管已有室温量子级联激光器,但它们发射频率通常高达 $35\sim 70\text{ THz}$)。 $0.5\sim 5\text{ THz}$ 波段,被看成激光技术领域,利用光电子方法使用飞秒激光器或输出近红外光的可调谐二极管激光器,连同光混频器、光导开关或非线性晶体,可将激光输出转化为太赫兹波。显然,使用不同的方法可以得到宽带脉冲或频率分辨的连续太赫兹波,其具体产生如下所述。

1. 连续波太赫兹辐射的产生

通过光混频可得到可调谐连续波(CW)太赫兹辐射,如将两束波长相近的激光,入射到由嵌入到低温生长的砷化镓中的金属螺旋线构成的天线上,而天线的核心是呈交叉手指结构的光混频器,这双色激光束就聚焦在光混频器上。当天线受到光照时,半导体砷化镓中就会产生



自由载流子,从而在金属电极上产生振荡的光电流,天线就将光电流转换为新的太赫兹波,其频率为两束激光频率之差。

实际上,用于产生连续波太赫兹辐射的理想激光源是近红外分布反馈(DFB)二极管激光器,因为这种二极管激光器能够在 850~860 nm 获得高功率、窄线宽输出,其调谐范围超过 1 000 GHz,不存在模跳变现象。通过选择具有恰当波长差的两个二极管激光器,可在 0~2 THz 或 1~3 THz 之间获得连续可调的太赫兹波频差。

最新的双色二极管激光器采用光纤元件进行光束合并与传送,具体使用保偏 2×2 光纤耦合器能在光混频器中获得必要的光束重叠。一般,每个双色光纤的输出功率约为 60 mW,这意味着太赫兹波的功率为 50~1 000 nW,这对于光谱应用已经够用,并且光电流输出的信噪比已经超过了 35 dB。DFB 激光器的优点是能以兆赫兹甚至亚兆赫兹的精度对激光频率进行控制,同时还能将太赫兹波线宽维持在仅 1.2 MHz,对应的时间尺度长达 80 ms。

2. 脉冲太赫兹波辐射的产生

利用飞秒激光可以产生超快宽带太赫兹波辐射,这种方案同样需要将激光输出聚焦到上述的半导体天线上,它所产生的自由载流子随后被外加或者内部电场加速,这种暂态电流能够产生宽光谱电磁场。通常,采用近红外波段 100 fs 的激光脉冲,可以获得 4~5 THz 的光谱带宽。不同的天线设计,可以在 800 nm 及电信用 1 550 nm 波长处发挥作用。

实际上,采用飞秒光纤激光器是一个很好的选择,用掺铒玻璃光纤构成紧凑可靠的锁模激光器,它们能够在 1 550 nm 处发射宽带脉冲,其平均功率超过 250 mW。二次谐波产生能够将基频辐射转化为 775 nm 的倍频脉冲。150 fs 的脉宽以及超过 100 mW 的平均功率能与现有的半导体砷化镓天线相兼容。通常,飞秒激光器的输出光束由分束器分为两束,其中一束通过庞大的机械延迟线,这种延迟线通常对声波噪声以及复杂的光学准直较为敏感。

目前,有一种名为电控光学取样(即 ECOPS)的新方法,它采用两束相位相对稳定的超快激光脉冲,通过压电元件对一根光纤振荡器的长度进行细微调制,能够精确地控制“探测”脉冲扫过太赫兹波脉冲的过程。这里不需要机械延迟线,因为整个太赫兹波装置是电控的。莱斯大学的研究人员演示证明了在扫描频率为几百赫兹、脉冲延迟为 50 ps 情况下小于 100 fs 的时间抖动。

6.3.2 太赫兹波的特点

由于太赫兹波在电磁波谱上位于微波和红外线之间,其频率范围是处于电子学和光子学的交叉区域,因此太赫兹技术的理论研究处在经典理论和量子跃迁理论的过渡区。而这个波段的电磁辐射具有独特的性质,其性质表现出一系列不同于其他电磁辐射的特殊性,从而使其具有许多方面不同的应用。

太赫兹波的特点主要表现如下。

(1) 穿透能力强。由于太赫兹波能穿透多种不透明的无定形物质,如对衣物、塑料、陶瓷、硅片、纸张、干木材等物质都具有较好的穿透性能。这是由于太赫兹波的散射不如可见光及近红外光那么显著,而散射的减小则意味着穿透深度的增加,可用来探测 X 射线、可见光、红外线探测不到的材料内部的缺陷和隐藏物,从而可用来进行安全检查。

(2) 光子能量很低。由于太赫兹波的光子能量很低,其光子能量比 X 射线小了 6 个数量

级,只有几个毫电子伏特,当它穿透物质时,也不会发生电离。很多太赫兹应用所需要的功率都不到 $1\ \mu\text{W}$,即使用于人体也绝对安全,从而可用来进行安全的无损检测。

(3)可区分材料的结构和种类。由于不同物质在太赫兹波谱区具有不同的吸收和色散性质,而很多凝聚态物质和生物大分子的振动和转动能级又落在太赫兹波段,可通过太赫兹光谱测量获得其特征光谱,因而可用于区分材料的结构和种类等。

(4)对水分的吸收很敏感。由于太赫兹波对水分的吸收很敏感,当探测如树叶、生物组织等含有水分的物质时,可表征水分的含量和分布,因而可用于生物医学成像和光的检测等;

(5)可得到高分辨率的清晰图像。由于太赫兹脉冲的波长比微波短,因而可提供更高分辨率的图像, $3\ \text{THz}$ 辐射的衍射极限小于 $250\ \mu\text{m}$,利用适当的小孔或针尖,太赫兹波成像可以达到较高的空间分辨率,并获得微波成像难以得到的高分辨率的清晰图像。

(6)可提供进行时间分辨光谱测量。由于太赫兹波频谱范围是位于微波和红外线之间,是电子学和光子学研究的交叉领域,其瞬态性和相干性提供了进行时间分辨光谱测量的条件,从而可通过光电取样获得时间分辨的电场变化信息,同时也可得到其电场振幅和相位的测量,为太赫兹时域光谱学提供基础等。

6.4 光信息调制传输技术

光信息调制传输技术在光电信息系统与安防监控系统中应用很多,因为只有把信息经过调制后再把这种调制光作为载波进行传输,才能不怕干扰稳定地传输到远处终端,从而在终端将信息解调显示出来,如安防监控系统的信息调制传输,以及到监控中心终端的解调与电视墙显示。本节主要介绍光信息的调制与解调技术。

6.4.1 光信息调制技术概述

1. 光信息调制的基本概念

在光电信息系统中,光通量是信息的载体,称为载波。使光载波信号的一个或几个特征参数按被传送信息的特征变化,以实现信息检测传送目的的方法便称为调制。光载波可以利用复合光波合成的非相干光通量,也可以利用窄带单色、有确定初相位的相干光波。

许多种光学参量都可以作为载波的特征参数。例如,非相干光通量的幅度、频率、相位和脉冲时间;相干光的波振幅、光频、相位、偏振方向以及光束的传播方向或光学介质的光学常数等。众多的可调制参量增加了光载波信号的处理灵活性和多样性。

光载波可以是只随信息而不随时间变化的,这是将信息直接调制到光载波上的广义调制。在更多的情况下是使载波光通量人为地随时间或空间变化,形成多变量的载波信号,然后再使其特征参数随被测信息改变。这种方法称为二次调制,因为它是对已随时间调制的光通量特征参数的再调制。

调制技术给辐射参数以确定的时间或空间变换,初看起来似乎增加了信号的复杂性,但是它可以改善光电信息系统的工作品质,有助于传输过程的信号处理,而提高传输能力。并且,还能更好地从背景噪声干扰中分离出有用的信号,以提高信噪比和测量灵敏度。此外,调制信



号还可以简化系统的结构,改善工作条件。有时利用调制还可以扩大目标定位系统的视场和搜索范围,因此调制技术是光电信息系统与安防监控系统中最常用的技术方法。

2. 光信息调制的类型

光信息调制按时空状态和载波性质可分作以下几种类型。

(1) 按时空状态分。

- 时间调制: 载波随时间和信息变化。
- 空间调制: 载波随空间位置变化后再按信息规律调制。
- 时空混合调制: 载波随时间、空间和信息同时变化。

(2) 按载波波分。

- 直流载波: 载波不随时间而只随信息变化。
- 交变载波: 载波随时间周期变化。

(3) 按调制方式分。

- 连续载波: 调幅波、调频波、调相波。
- 脉冲载波: 脉冲调宽、调幅、调频等。

3. 典型的调制方法

(1) 连续波调制。一般情况下,调制后的载波具有的形式为

$$\phi(t) = \phi_0 + \phi_m [V(t)] \sin \{ \omega [V(t)] t - \phi [V(t)] \} \quad (6-5)$$

式中, ϕ_0 是光通量的直流分量,一般不载任何信息; ϕ_m 和 ω 是载波交变分量的振幅和频率; $V(t)$ 是由被测信息决定的调制函数,根据调制参量的不同可以分为

- 振幅调制 (AM): 调制参量为 $\phi_m [V(t)]$ 。
- 频率调制 (FM): 调制参量为 $\omega [V(t)]$ 。
- 相位调制 (PM): 调制参量为载波的初始相位 $\phi [V(t)]$ 。

由于这些调制在电子技术等基础书籍中均有详细介绍,这里就不再赘述。

(2) 脉冲调制。若将直流光通量用斩光盘调制,使光通量间歇通断可以得到连续的光脉冲载波。若使载波脉冲的幅度、重复频率、脉宽、相位等参量或它的组合按调制信息改变,可以得到如图 6-19 给出的各种类型的脉冲调制方式。

① 脉幅调制。如图 6-19 (a) 所示,它的脉冲周期、相位、宽度保持不变,只有脉冲幅度 A 随信号改变,就是脉幅调制。

② 脉冲频率调制。如图 6-19 (b) 所示,它是脉冲的幅度 A 和持续时间 t_u (或称为脉宽) 与脉冲相位保持不变,只改变脉冲的重复周期 T_u ,就是脉冲频率调制。

③ 脉宽调制。如图 6-19 (c) 所示,它是脉冲序列的幅度 A 和重复周期 T_u 与脉冲相位保持不变,只是脉冲的持续时间 t_u 随调制信息改变,则称为脉宽调制。

④ 脉冲相位调制。如图 6-19 (d) 所示,它是脉冲的振

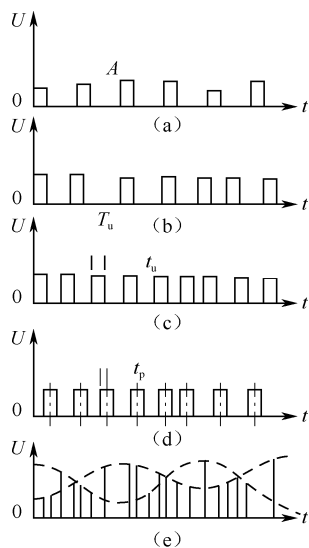


图 6-19 脉冲调制类型

幅、脉宽、周期保持不变,只是相对于确定时间的脉冲位置 t_p 随信息改变,则称为脉冲相位调制。

⑤ 脉冲复合调制。如图 6-19 (e) 所示,表示了两个同样采用脉幅调制的光信号,它们的脉宽不同,但它们的周期与相位不变。将这两个信号放在同一信道中传送,只要在接收端设置脉宽鉴别电路,利用光脉冲宽度不同的特点就能将它们分离到两个通路上。在各自的通路里,从已调幅的脉冲序列中解调出信号包络线,即可得到被传送的信息。

调制方法不仅能提高光电系统的测量灵敏度,而且能在同一光学通路中实现多个信息的多路传输。利用激光器的多路信号传输,已广泛应用于光纤通信传输中。

(3) 编码调制。编码调制是首先把连续的模拟信号先变成脉冲序列,再变成代表信号信息的二进制编码,最后对载波进行强度调制,因此实现编码调制有如下的三个过程。

① 采样。即把连续的模拟信号波分割成不连续的脉冲波,并用一定的脉冲序列来表示,且脉冲序列的幅度与信号波的幅度相对应。根据采样定理,只要采样频率比所传输信号的最高频率大两倍以上,就能够恢复原信号。

② 量化。即把采样后的脉冲幅度调制波进行分级取“整”处理,然后用有限个数的代表值,来取代采样值的大小。

③ 编码。即把量化后的数字信号,变换成相应的二进制编码的过程。

由上看出,实际上编码调制也就是用二进制数字信号“1”码和“0”码对光载波进行调制,即数字调制。而数字信号大都采用这种脉冲编码调制(即 PCM)。总之,它首先将连续的模拟信号通过“采样”变换成一组调幅的脉冲序列;其次通过“量化”和“编码”过程,形成一组等幅度、等宽度的矩形脉冲作为“码元”,即用“有脉冲”和“无脉冲”的不同组合(有一定位数的脉冲码元)代表采样值的幅度,这就是脉冲编码,结果将连续的模拟信号变成了 PCM 数字信号;最后将 PCM 数字信号直接对 LD 光源进行光强度调制。

这种编码调制方式,具有很强的抗干扰能力,在数字光通信中已得到广泛应用。其原因是:首先,因为数字光信号在信道上传输的过程中引进的噪声和失真,可采用间接中继器的方式去掉,因而抗干扰能力强;其次,用数字光信号对数字光纤通信系统的线性要求不高,从而可充分利用 LD 光源的功率;最后,使设备便于和 PCM 电话终端、PCM 数字彩色电视终端、电子计算机终端相连接,从而组成既能传输电话、彩色电视信号,又能传输计算机数据的多媒体综合通信系统。

(4) 其他光学参量的调制。表征光波几何的或物理特性的参量除了有光强,变化频率之外还有许多其他的参数,如光传输中偏振面的方向和光束的传播方向等的调制。

① 偏振面方向的调制。当光波在旋光性物质中传播时,偏振面的转动可以用来取得有关该物质性质的信息。例如,糖溶液或松节油,当偏振光通过该溶液后,偏振面的转角 $\Delta\varphi$ 不仅与通过溶液的路程长度 l 有关,而且还正比于溶液的浓度 c ,即为

$$\Delta\varphi = \alpha lc \quad (6-6)$$

式中, α 是溶液的旋光率。因为偏振面的旋转角有方向性,如葡萄糖为右旋,果糖为左旋。因此,测量偏振面的旋转角可以测量溶液的浓度和物质的性质。这样,对于糖溶液浓度的测量,可以采用光度测量方法中的指零法,也可以采用调制入射偏振角方式进行调制测量,此时如图 6-20 所示。

周期性地改变起偏器偏振角的位置,使入射光辐射的电场强度矢量 E 相对平均位置周期性变化,单位时间内 E 的变化次数为调制频率,最大偏转角 φ_{\max} 。当未插入溶液试样时,检偏器的输出光通量是平均值为零的交变分量。插入溶液后输出光通量平均值改变。利用后面提及

的解调方法可判断平均值的大小和极性。调制偏振角的测量方法可应用于偏振糖度计中。典型的工作参数：照明波长 $\lambda=0.59\text{ }\mu\text{m}$ ，调制频率 $f_0=50\text{Hz}$ ，最大偏振角 $\varphi_{\max}=3.5^\circ$ 。

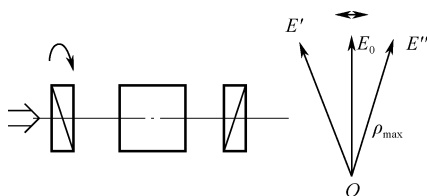


图 6-20 偏振角调制

② 光束传播方向的调制。对于光束传播方向的调制，可以通过周期性地改变光路中光学元件，例如反射镜的方位角来实现。这种光束传播方向的调制，主要用于对空间目标的扫描中，详情可参阅本书参考文献[1]中 6.3 节。

4. 光信息调制器

可实现单色光波或复合光通量信息调制作用的装置称为光信息调制器，调制器包括光控、辐射源、机电和电子调制器。这里主要介绍光电信息系统中应用较多的前二类调制器。

(1) 光控调制器。对于光学性质随方向而异的一些介质，常发生一束入射光分解为两束折射光的现象，称为双折射，相应的介质称为各向异性材料。由于它们两个方向折射率不同，这种材料具有旋光性，可以改变入射偏振光的偏振方向。材料折射率各向异性的性质能在电场、磁场和机械力等外力作用下形成和改变。利用这些光控效应，可以进行光波振幅、频率、相位、偏振状态和传播方向等参量的调制。这些调制的器件又称为光电控制器件，简称光控器件。通常用得最多的是对光的振幅进行调制，由于光强与光振幅的平方成正比，因此对光的振幅进行调制也就是对光强的调制。根据引起光控效应外因形式的不同，光控调制器有以下三种。

① 电光调制器。外电场加到光学介质上引起介质折射率的变化，就称为电光效应。具有电光效应的材料有半导体、绝缘晶体和有机聚合物。具有电光效应的电光晶体有铌酸锂 (LiNbO_3) 晶体、砷化镓 (GaAs) 晶体、钽酸锂晶体以及半导体硅等。显然，利用某些物质的电光效应可以制成电光器件。一般地，电光效应有两种：一种是折射率的变化与外电场强度的一次方成正比，称为泡克耳斯 (Pockels) 效应；另一种是折射率的变化与外电场强度的平方成正比，称为克尔 (Kerr) 效应。具有电光效应的材料，在外电场的作用下，材料的折射率随之发生变化，从而使同时通过该材料的光波的参量（如幅度、相位等）也发生改变，而获得光调制信号，这样制成的光控制器件就是电光调制器。利用泡克耳斯效应制成的调制器，称为泡克耳斯盒，其中的光学介质为非中心对称的压电晶体。泡克耳斯盒又分为纵向调制器和横向调制器两种。利用克尔效应制成的调制器称为克尔盒，其中的光学介质为具有电光效应的液体有机化合物。

欲知其结构与参数等详情，可参阅本书参考文献[1]中 6.2.2 节。

② 磁光调制器。原来没有旋光性的透明介质，如水、铅玻璃等，放在强磁场中，可产生旋光性，这种现象称为法拉第效应。具体的现象是，把磁光介质放到磁场中，使光线平行于磁场方向通过介质时，入射的平面偏振光的振动方向就会发生旋转，转移角的大小与磁光介质的性质、光程和磁场强度等因素有关。其规律为

$$\theta = V l H \cos \alpha \quad (6-7)$$

式中, θ 为振动面旋转的角度; l 为光程; H 为磁场强度; α 为光线与磁场的夹角; V 为比例常数, 称为费尔德常数, 它与磁光介质和入射光的波长有关, 是一个表征介质磁光特性强弱的参量。不同介质, 振动面的旋转方向不同。顺着磁场方向看, 使振动面向右旋的, 称为右旋或正旋介质, V 为正值。反之, 则称为左旋或负旋介质, V 为负值。

对于给定的磁光介质, 振动面的旋转方向只决定于磁场方向, 与光线的传播方向无关, 即无论光的传播方向与磁场方向平行或是反平行, 线偏振光的旋转方向相同。利用法拉第磁光效应这一特点, 还可用来制作光隔离器。这里讲磁光调制器。

欲之其结构与参数等详情, 可参阅本书参考文献[1]中 6.2.2 节。

③ 声光调制器。声波在介质中传播时, 会引起介质密度(折射率)发生周期变化, 可将此声波引起的介质密度周期变化的现象称为声光栅, 声光栅的栅距等于声波波长。当光波入射于声光栅时, 即发生光的衍射, 这种现象称为声光效应。声光器件是基于声光效应的原理来工作的, 它分为声光调制器和声光偏转器两类, 它们的原理、结构、制造工艺相同, 只是在尺寸设计上有所区别。欲之其结构与参数等详情, 可参阅本书参考文献[1]中 6.2.2 节。

④ 其他的光控调制器 具体有下列几种。

(a) 二硫化碳光控调制器。在正交放置的两偏振器之间, 可放置一个装有二硫化碳的透明槽, 当它们未加外部激励时, 入射光束将不能通过该装置。但若对该介质作用以强功率的短脉冲激光时, 则材料的旋光作用会使输入光束偏振方向改变, 因而能透过该装置形成持续时间仅为纳秒级的超短光脉冲。显然, 这种装置的旋光作用是在外部光辐射的激光下形成的。

(b) 热光调制器。热光调制器是利用热光效应的光调制器, 它是利用硅的折射率随温度变化的特性, 在硅基光调制器的光波导上制作薄膜加热器而成的。控制这个加热器, 改变光波导的温度, 即可实现光频调制。硅的温度变化系数为 $2 \times 10^{-4}/\text{K}$ 数量级。

马赫-曾德尔干涉仪型热光调制器, 可获得几十 GHz 的调制带宽。

(c) 吸收效应调制器。吸收效应调制器是利用光吸收效应或电吸收的光调制器。光吸收效应的光调制器是因为吸收区耗尽层的宽度是随外加电压而变化的, 再利用半导体吸收区载流子耗尽致使光吸收的原理, 通过改变电压来控制耗尽层对光的吸收, 而实现光调制的, 这种光调制器具有宽的调制带宽, 并且价格低廉。电吸收光调制器是利用半导体材料的电子耗尽的吸收特性, 它不仅具有调制速率高、驱动电压低与尺寸小等优点, 而且还可与分布反馈激光器单片集成, 在调制器和激光器间获得高的耦合效率和调制光的高输出功率, 从而减小系统尺寸和降低成本。

(2) 辐射源调制器。通常, 在光辐射源电源上, 施加交变或脉冲的激励电压而实现电源调制的方法, 在许多情况下比起在电路中加入调制器的方式更为简单和有效。常用的光源, 如白炽灯或气体放电灯都具有较大的发光惰性, 因此实现电源调制的利用效率和调制频率较低。特别是白炽灯, 即使采用细灯丝的专用灯泡, 对于调制频率为 100~200 Hz 的调制度也不超过百分之几, 因此白炽灯的电源调制只能在很低的频率下进行。在直接利用工业频率 50 Hz 激励时, 会产生 100 Hz 的调制光通量。为了提高调制度, 常将工频电源经半波整流后再接到白炽灯上, 这时会产生 50 Hz 幅度较大的调制光通量。在工业测量中, 这是一种提高调制度的极简单易行的方法。利用气体放电光源可以得到几千赫兹的调制频率和 80% 的调制度。但大功率的气体放电灯调制器是比较笨重的设备。

固体发光器件, 如半导体发光二极管就可以得到很高的调制频率, 其上限频率可达到上百兆赫兹, 且驱动设备简单, 发光效率也较高, 是目前应用最广泛的光通量调制器; 对于半导体



等激光器，也有许多利用激励电源直接调制光强度的应用实例，这里就不一一列举了。

6.4.2 调制信号的解调技术

1. 解调的基本概念

从已调制信号中分离出有用信息的过程称为解调，实现解调作用的装置就是解调器。由于解调是从载波信号中检测出有用信息的过程，所以也称为检波，实际上，解调或检波是信号调制的相反过程。

在时域分析中，调制是将有用信息及其时间变化载荷到载波的特征参量之上，而解调则是从这些调制了的特征参量上再现出所需信息。从频域分析的角度，调制是将信号的频谱向以载波频率为中心频率的高频方向变换，而解调则是将变换了的频谱分布复原或反变换为初始的信号频谱分布。

不同的调制信号有不同的解调方法。利用二极管的调幅波解调的直线律检波在电子技术中已很熟悉，因而就不再介绍了。这里主要介绍应用较多的能检测调制信号幅度与确定载波相位数值的解调的相敏检波。至于调频信号的解调，一般要用鉴频电路，这可参考有关的电子电路书籍与资料，就不再论述。

2. 相敏检波和同步解调

对于相位调制的载波信号，载波和参考信号间的相位差随被测信号改变。这种信号的解调，应该对载波的相位敏感，其检波器的输出电压，应反映出相位的变化。相应解调器的输出特性如图 6-21 (a) 所示。在另外的情况下，对于有些调幅信号，不仅要求检测变量变化的大小，而且希望确定变化的方向或极性，它的输出特性如图 6-21 (b) 所示。对这种有极性变量的调制，通常可用载波的幅度大小表示变量的数值，而用载波的相位正反表示变量的极性。显然，为处理这种调幅信号也需要有对相位敏感的解调方法。这种不仅能检测出调制信号的幅度，而且能确定载波相位数值的解调，称为相敏检波或同步检相。其

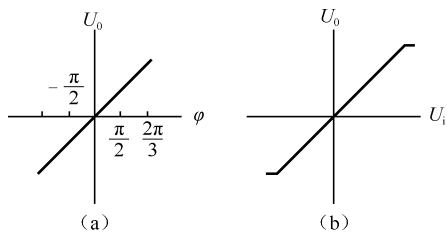


图 6-21 相敏检波和同步解调的输出特性

实，它的基本原理就是乘积检波。

相敏检波的原理表示于图 6-22 中，它由解调器和低通滤波器串联而成。这里，解调器被看成是已调制信号和参考信号间的模拟乘法器，因而又称为乘积检波。欲之图中符号及公式详情，可参阅本书参考文献[1]中 6.2.3 节。

相敏检波具有下述性质。

(1) 相敏检波器消除了高次谐波的影响，使输出信号幅度与载波信号的幅度成正比。因此，能解调和再现出调幅信号 $U_m \cos \Omega t$ ；

(2) 相敏检波器的输出信号和载波与参考信号间的相位差 φ 有关。在载波信号幅度不变的条件下，能单值地确定载波信号和参考信号间的相位差。

由于相敏检波的上述性质，在调制信号的处理中得到了广泛的应用。

(1) 对于幅度不变而单纯相位调制的情况,能解调出相位调制信息。因此,可用于以调制盘检测光学目标方位角的测量中。

(2) 对有极性的调幅信号,载波信号的相位差只取 $\varphi=0^\circ$ 和 $\varphi=180^\circ$ 两种状态。这表明,当载波与参考信号同相位时,输出信号为正值,反之为负值。因此,这个性质可用做几何位置偏差的极性判断。

(3) 对于幅度和相位同时变化的情况,相敏检波器的输出信号取决于载波信号和参考信号相位的瞬时值比较:同极性输出为正值;反极性输出为负值。这种方法在扫描调制测量中得到了应用。

3. 典型的相敏检波电路

相敏检波的实际电路有许多种类型。图 6-23 给出了常用的二极管环形检相电路和三极管相敏检波电路。由图可知,已调制的载波信号通过放大器 K 由输入变压器输入,参考电压由中心抽头变压器引入。在参考电压的正负半周期内,分别控制两对二极管或三极管的通断,使输入信号在负载电阻上全波整流输出。显然,其输出电流的流向,取决于参考电压和信号电压的相位关系,从而达到检相整流的目的。

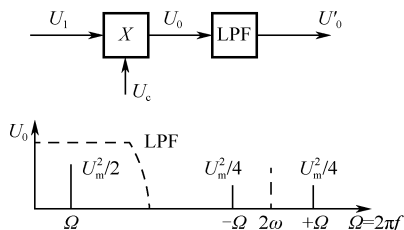


图 6-22 相敏检波的原理框图和频谱

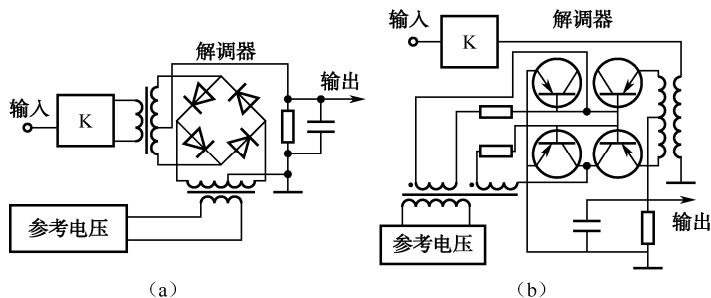


图 6-23 二极管和三极管环形检相电路

6.5 光电信息传输技术在安防中的应用

6.5.1 光纤传输技术在安防中的应用

目前,光纤传输技术在安防监控系统中应用很广,尤其当前的有线网络均是由光纤光缆所构成。因此,凡是大型安防监控系统,其传输系统均采用光纤传输技术。本节将简介一下它在安防监控技术中的典型应用。

1. 光纤多路视频传输系统

在实际的应用中,通常要在一条光纤上同时传输多路视频信号,这种系统称为光纤多路视频传输系统,即多路复用系统。它所采用的技术有光波分复用、光频分复用及光时分复用。这



里只简要介绍一下采用光波分复用技术的光纤多路视频传输系统。

光波分复用 (Optic Wavelength Division Multiplexing, OWDM) 技术是在一根光纤中能同时传输多波长光信号的一项技术,其基本原理是在发送端将不同波长的光信号组合起来(复用),在接收端又将组合的光信号分开(解复用),并送入不同的终端,因此将此技术称为光波长分割复用。

光 WDM 技术对网络的扩容升级、发展宽带新业务(如 CATV、HDTV 和 BIP-ISDN 等)、充分挖掘光纤带宽潜力、实现超高速传输通信等,具有十分重要的意义,尤其是 WDM 加上光纤放大 EDFA,更是对现代电信网具有强大的吸引力。

光波分复用技术的一种光双向单纤传输系统,如图 6-24 所示。

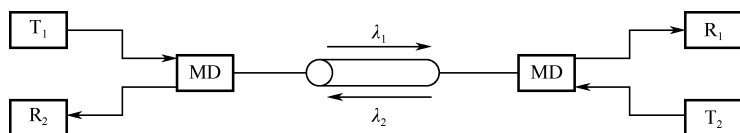


图 6-24 光双向单纤传输

由图可见,它是在一根光纤中实现两个方向信号的同时传输。如终端 I 向终端 II 发送信号,由波长 λ_1 携带;终端 II 向终端 I 发送信号,由波长 λ_2 携带。用以实现彼此双方的通信联络,这种结构也称为单纤全双工通信系统。

光双向单纤传输系统的光波分复用技术的一种应用于视频监控的实例如图 6-25 所示,前端(左端)摄像机摄取的视频信号及麦克风感应的声音信号,在混合器中形成基带信号,并以 850 nm 的光波长经单根光纤传输到中心端(右端)的分离器,该基带信号经解调(分离)后,分别送往监视器和音箱。同时,中心端的声音信号及由控制器发出的控制信号,经混合器后,以 1 300 nm 的光波长,经同一根光纤返送到前端的分离器,分离出来的控制信号被送往解码器,经解码后可形成控制云台、电动变焦镜头及其他前端设备动作的各种控制电压。这样,借助单根光纤就实现了在中心端遥控远端摄像机组件的目的。

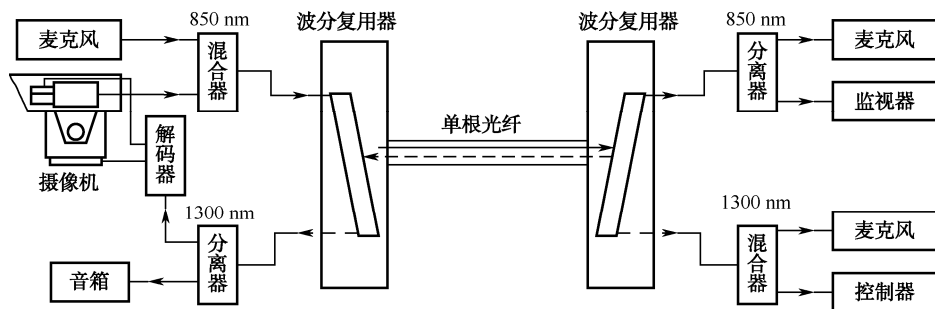


图 6-25 光波分复用技术的一种应用实例

这种光 WDM 技术的主要技术特点有

(1) 可充分利用光纤的低损耗波段,增加光纤的传输容量,以降低成本。目前光纤通信系统只在一根光纤中传输一个波长信道,而光纤本身在波长区域有很宽的低损耗区,有很多的波长可以利用,因而具有很大的应用价值和经济价值。

(2) 可同时传输多种不同类型的信号。由于 WDM 技术中使用的各波长相互独立,因此可实现多媒体信号(如音频、视频、数据、文字、图像等)的混合传输。

(3) 可实现单根光纤双向传输, 由于许多通信(如打电话)都采用全双工方式, 因此可节省大量的线路投资。

(4) 可降低对一些器件性能上的极高要求, 同时又能实现大容量传输。因为随着传输速率的提高, 许多光电器件的响应速度已显不足, 因而需使用 WDM 技术来弥补。

(5) 对已建成的光纤通信传输系统扩容方便, 只要原系统的功率富余度较大, 完全可进一步增容, 而不必对原系统进行大的改动。

(6) 光 WDM 技术在以上三种基本结构基础上, 还有很多其他应用形式, 如广播式分配网络, 多路多址局域网络等, 因此对网络的应用十分重要。

2. 光纤模拟射频多路视频信号传输系统

一种实用的光纤模拟射频多路视频信号传输系统的典型的结构框图如图 6-26 所示, 由图可知, 它利用射频多频道视频信号直接调制单模激光器, 并不加中继放大、均衡等处理, 只经一根低损耗单模光纤长距离传送到光接收探测器, 然后经检波器直接恢复多频道电视射频信号, 再经对应各射频信号的解调器, 解调出视频全电视信号。

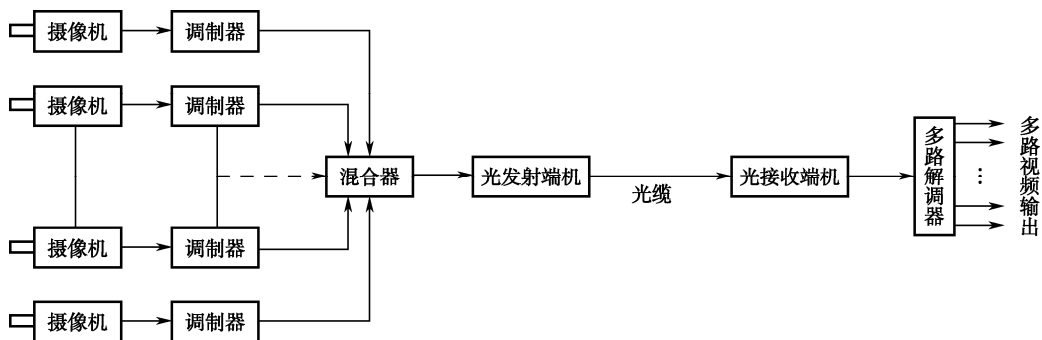


图 6-26 光纤模拟射频多路电视系统方框图

实际上, 图 6-26 是一种 AM 光纤传输系统, 它是先将各摄像机的视频信号分别调制到对应的射频频道上, 并经混合后再去调制光发射端机。光发射端机输出光信号, 以送入光纤中。经光纤传输后, 由光接收端机解调出射频信号, 再经射频解调器, 解调出对应摄像机的视频全电视信号。

6.5.2 无线光波传输技术在安防中的应用

自从 1800 年英国天文学家 F.W.赫歇尔发现红外辐射后, 红外传输技术的发展已经历了两个世纪有余。近几十年来, 除红外传输技术之外, 又涌现出 RF 射频、Wi-Fi、蓝牙、Zigbee 等新兴的无线传输技术。为什么红外传输技术依然能在家居控制领域占据一席之地呢? 主要是它与其他短距离无线传输技术相比, 具有稳定性好、私密性强、成本低廉等特点。

1. 红外传输技术在智能家居控制系统中的应用

智能家居系统是利用综合布线技术、网络通信技术、安全防范技术、自动控制技术、音视频技术将灯具、窗帘、家用电器、报警设备等进行整合, 实现统一管理和智能控制。而红外传

输技术在这样一个控制系统中，可以同时扮演多种角色，能起到许多关键性作用。

(1) 红外线遥控。红外遥控器在人们日常生活中的应用，已有多年的历史。传统的红外遥控器，一般是针对单个电器进行控制，例如通过电视遥控器控制电视机，通过空调遥控器控制空调，大部分人的家庭都有着两把、三把甚至更多的遥控器。但随着智能家居控制系统的出现，我们已经不需要这么多遥控器了，只需要一把遥控器，就可以对家中所有的电器设备进行控制。采用综合布线技术，配合相关的通信协议，可以将家中的所有灯具、窗帘、各类家用电器及报警设备整合到统一的系统当中，然后通过遥控器或者控制面板对它们进行操作。另外，还可以配合智能家居系统的情景功能，用最简单的操作同时控制多个设备。例如下班回家后，只需要拿起红外遥控器按一下“夜间模式”，即可自动关闭窗帘、开启客厅灯光，打开电视机、空调、音响，并将家庭报警设备设置为主人在家的模式，防止误报。这样就省却了对电器及设备进行逐个操作的繁琐，轻轻一按遥控器就能收获好心情。

(2) 红外探测。红外探测技术分为主动式红外探测及被动式红外探测，两者在智能家居中有着不同的应用方式。主动式红外探测，是通过红外线发射器发出一束或多束经过调制处理的平行红外光束，由红外线接收器进行接收，并转换为数字信号发送给报警控制器，若传输区间出现障碍物，就会触发报警。主动式红外探测在家庭报警系统中有着广泛的应用，比如在阳台的两端各安装红外发射及接收器，只要有人翻越阳台，马上就会触发报警信号，让主人在第一时间做好戒备。

被动式红外探测器是通过热释电传感器，对相应区域的红外信号的变化，来判断该区域内是否有人。由于是走动的人体，当人通过探测区域时，热释电探测器就感应到人体变化的红外信号，就会向系统提供反馈信号，配合智能家居的联动功能，可以实现人来灯亮、人走灯灭的功能。比如在卫生间的门顶安装一个被动式红外探测器，当主人起夜，走进卫生间时，灯光会自动打开，而离开卫生间后，灯光自动关闭，既方便又能达到省电的效果。

(3) 其他应用。红外线传输作为一种无线通信技术，还可以应用于家电设备之间的数据传输方面，如音频传输。无线红外技术最大的优点就是带宽大，甚至要超过其他三种主流无线技术，这就意味着采用红外无线技术的音频产品可以不用压缩来传输大容量的音频信号，可以满足更高码率格式的运行。国内的多媒体音箱领军厂家漫步者在2008年发布了一款红外功放——Ramble。由于它采用红外传输方式，无需数据线，可以随意安装于室内的任意位置，如安装于墙面或天花板，相当方便，而且不会因为裸露在墙面上的线材而影响室内装修的美观性。

红外传输技术由于其技术成熟、稳定性好、私密性强、且成本相对低廉，在智能家居控制系统中得到广泛的应用。虽然它存在着一些技术瓶颈及缺陷，如传输距离短、通信角度小，但目前其他无线通信技术还未达到尽善尽美的程度，所以在接下来很长的一段时间内，红外传输技术依然会在智能家居控制系统占据一席之地，与RF射频、Wi-Fi、Zigbee等无线技术共存，为大众家居生活质量的提高做出贡献。

红外线传输技术在智能家居控制系统中的应用，如图6-27所示。

2. 红外线车辆检测器在高速公路监控系统中应用

高速公路监控系统是在城市街道交通管制系统的基础上发展起来的。近年来随着计算机技术、自动化技术和光纤通信技术的发展，我国的高速公路监控系统的技术结构也随之变化，车辆检测器尤为突出。红外线车辆检测器的应用非常广泛，因其价格低廉，技术性能稳定，深受广大业内人员的欢迎。

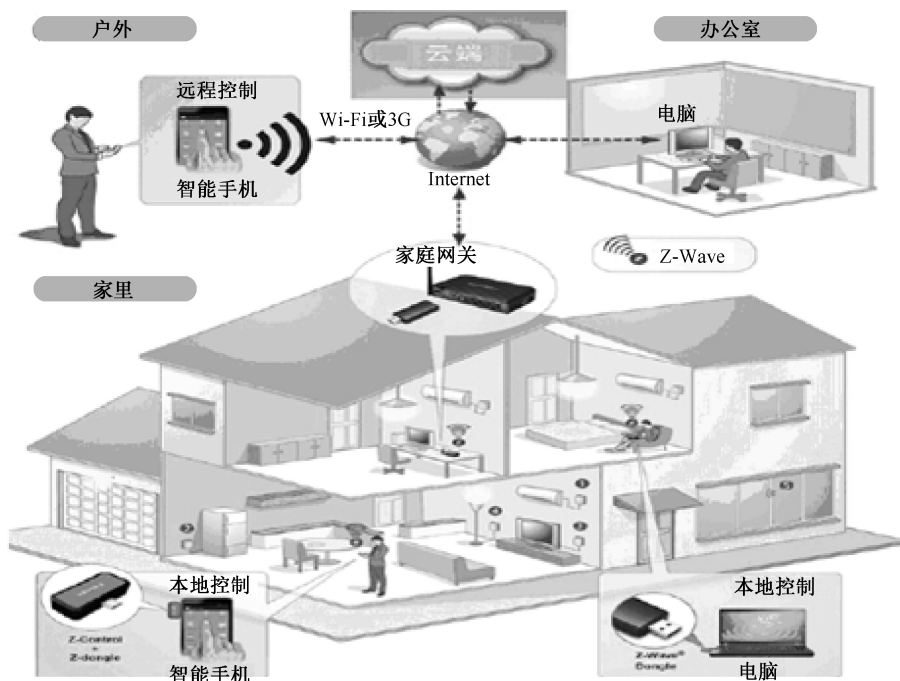


图 6-27 红外线传输技术在智能家居控制系统中的应用

红外线车辆检测器是利用被检测物对光束的遮挡或反射,通过同步回路选通电路检测物体有无的。物体不限于金属,所有能反射光线的物体均可被检测。光电开关将输入电流在发射器上转换为光信号射出,接收器再根据接收到的光线的强弱或有无对目标物体进行探测。多数光电开关选用的是波长接近可见光的红外线光波型。

与其他检测技术相比,红外线车辆检测器具有以下特点。

(1) 它通过类似于光学镜头式地瞄准可视范围,可以按车道“聚焦”检测域。红外线车辆检测器是靠检测车辆进入收费车道时,遮挡自身发射的红外线进行工作的,检测器收集外界的红外辐射聚焦到红外传感器(通常采用热释电检测器,这种元件在接收的红外辐射温度发生变化时就会向外释放电荷)上,检测处理后向车道工控机发出信号。

当遇到车辆进入车道遮挡住传感器发出的红外光线时,传感器发给收费亭内工控机信号,车道摄像机实时抓拍,图像记录在工控机中,这样就完成了一次车辆图像抓拍,与以往单独使用线圈式车辆检测器配合车道摄像机实施抓拍的方式相比,红外线车辆检测器使图像抓拍的位置比较精确,误差小于 1 cm,而且反应时间短。

(2) 它不受恶劣气象条件或物体颜色的影响。红外线车辆检测器标准检测物体为 75 mm 以上的不透明物体,在工作时适应的温度为 $-25^{\circ}\text{C}\sim 55^{\circ}\text{C}$,湿度为 45~85%RH。该检测器以被动的方式检测,能穿透烟雾和水汽,在很大程度上不受气候的影响。只对可视范围内精确定义的温度突然变化做出响应,并忽略在一天内和一年内天气情况导致的路面缓慢变化。通过以微处理器为核心的数字化处理,用以帮助摄像机实现图像的抓拍。

(3) 它仅接收自发的红外辐射,不会造成对周围环境的辐射污染。

(4) 被动车辆检测器器件功耗很小,隐蔽性较好,能装在收费亭外部,不需要昂贵的土建施工费用。

红外线车辆检测器安装过程很简单,只需将检测器中的信号线接入到工控机中即可实现,



需要用到的工具和材料也很少,不影响收费工作的正常进行。在连接完毕后,也可以重新设置和校准,节约了大量的人力物力。

红外线车辆检测器是使高速公路监控收费系统稳定、可靠、有效、持续运行的重要保证。例如,唐港高速公路采用被动式红外线车辆检测器进行车辆图像抓拍和车牌号码识别,使唐港高速公路图像抓拍率达到 92.4%,大量地杜绝了车主、司机作弊的行为,并具有安装维护简单、稳定、可靠、监测直观等优点,系统稳定运行已多年,效果良好。

3. 红外线传输技术在其他方面的应用

红外线的应用非常广泛,作用也非常大,以下再举几例。

(1) 红外线在医疗保健中的应用。在红外线区域中,对人体最有益的是 $4\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ 波段,它有着孕育宇宙生命生长的神奇能量,所有动物、植物的生存、繁殖,都是在红外线这个特定的波长下才得以进行,因此许多专家、学者称之为“生育光线”。远红外纺织品是近年来新兴的一种精密陶瓷粉经特殊加工制成,具有活化组织细胞、促进血液循环和改善微循环、提高免疫力、加强新陈代谢、消炎、除臭、止痒、抑菌等功能。

(2) 红外线作接口应用。越来越多的电子设备装配了红外端口,支持无线传输,避免了通过电缆连接的累赘,如利用红外线可通过手机上网。

(3) 红外线遥感的应用。在漆黑的夜晚应用红外遥感设备可以探测各种矿藏,我国利用红外遥感照片,调查了地热资源和放射性矿藏等资源。

(4) 红外线侦察的应用。侦察卫星携带红外成像设备可获得更多地面目标的情报信息,并能识别伪装目标和在夜间对地面的军事行动进行监视;导弹预警卫星利用红外探测器可探测到导弹发射时发动机尾焰的红外辐射并发出警报,为拦截来袭导弹提供一定的预警时间。

(5) 红外线制导的应用。红外制导就是利用目标本身的红外辐射来引导导弹自动接近目标,以提高命中率。

6.5.3 太赫兹波传输技术在安防中的应用

太赫兹波的应用非常广泛,这里主要介绍它在国家安全防范等方面的应用。

1. 可进行非接触的安全检测与识别

太赫兹波最具吸引力的应用是将太赫兹辐射成像及其光谱灵敏的优点相结合,因而可在安防领域大显身手。由于许多化合物在 $0.5\sim 5\text{ THz}$ 波段具有独特的吸收谱线,因此在木箱、包裹或邮件内隐藏的爆炸物或违禁药物,不仅可被精确定位,而且由于它们独特的光谱“指纹”,还能准确地识别出它们到底是什么。

此外,由于太赫兹波对衣物、塑料、陶瓷、硅片、纸箱、干木材等物质具有较好的穿透性能,尤其是对塑料、纸箱等有很强的穿透力,因而可用来对已包装好的内部货物,以及人体身上的隐藏物进行成像,如经实验可检查出藏在棉布后的陶瓷刀片等,所以可用太赫兹技术进行非接触的安全检测,并识别是否有爆炸物、化学或生物危险品、毒品、刀枪武器等,尤其是可用来进行邮件监测,识别邮件内的隐藏物,如邮件炸弹等。

目前,太赫兹技术现已受到了反恐、公安、保安等部门和海关、机场、车站检查等方面的重视。

2. 可进行远程监视与探测

由于太赫兹辐射具有比微波更短的波长及更为精确的时间检测装置,可做成太赫兹雷达以目标进行敏感探测与监视,它可探测比微波雷达更小的目标和实现更精确的定位,因此,太赫兹雷达在国家安全与军事上有广阔的应用前景。

一般,雷达主要靠接收目标的反射信号来发现目标,如果目标表面能吸收或散射雷达波,就可大大减小被对方雷达发现的概率,从而达到隐形的目的。通常,用吸波材料构成的隐形目标只对很窄的一个波段适合,所以常规的窄带微波雷达无法有效探测雷达截面很小的隐形飞机。而太赫兹雷达发射的太赫兹脉冲包含了丰富的频率,可使隐形飞机的窄带吸波涂层失去作用。

此外,这种宽带太赫兹雷达波,对隐形飞机的扁平形、十分薄的边缘,不会像普通雷达那样形成共振吸收而减弱反射强度,它仅能产生很小的共振,从而有比普通雷达强得多的反射波。这种太赫兹雷达能以 GW 级和成千上万种频率发射纳秒甚至皮秒级的脉冲,使它拥有许多普通窄带雷达所没有的优点和能力。

总之,由于雷达主要是用来探测空中目标方位和距离的,而超宽带太赫兹雷达以其高的距离分辨率、强穿透力、低截获率、强抗干扰性以及优越的反隐身能力,而完全可用于对国家安全远程监视与探测。显然,有了此种雷达的远程监视,即可预防类似美国 9·11 事件的发生。

此外,利用太赫兹技术还可进行远距离成像、多光谱成像及三维立体成像,在战场上可用于显示前方灰尘或烟雾中的坦克等。

3. 可用于通信传输

太赫兹波的另一个潜在应用是通信市场。虽然目前尚不存在合适的太赫兹波传输线,但人们正在设想使用 100 GHz 及以上的自由空间信道(卫星通信或无线下载高速视频等)。由于太赫兹波是很好的宽带信息载体,显然它能做到的信道数比微波多得多,尤其适合于卫星间、星地间及地面局域网的宽带移动通信,如星际通信、短程大气通信等。

目前,太赫兹波通信收发机的原理实验已经开展,作为宽带无线通信手段正在研发中,如欧盟等发达国家正进行该方面合作项目的开发,不久将会有产品出现。

4. 可用于无损检测

由于太赫兹波有强的穿透力,且其光子能量很低,只有几个毫电子伏特,穿透时不易发生电离,因而可用来进行安全的无损检测。尤其是对一些塑料泡沫等绝缘材料内部的缺陷和裂痕等进行无损检测和成像,在航空、航天结构材料的检测和评估方面具有重要的应用价值。如可对航天飞机燃料舱的隔热材料进行有效的无损探伤,被美国宇航局选择为发射中用来进行缺陷检测的技术之一。

此外,还可用于大规模集成电路的质量检测,如可拍摄到封装在 IC 芯片中的封装的金属引线等。

5. 可用于 DNA 的检测与识别

因为很多蛋白质和 DNA 的晶格振动模式从理论上预言是处于太赫兹波段的,所以可用来进行 DNA 的检测与识别。带有 DNA 和其他生物分子的压片已经使用太赫兹方法得到了复数的折射率,在低频红外激发的模式上存在着大量的吸收。



DNA 的分析是利用鉴别核酸上的碱基序列,而开发并进一步应用的。根据折射率的不同,利用太赫兹光谱,已经具有分辨单股和双股 DNA 的能力。最近,又得到了检测飞摩尔灵敏度的单碱基对变异的识别能力,从而可对 DNA 进行较好的检测与识别。

6. 可用于生物和医学的检测与诊断

氨基酸和蛋白质等生物大分子的无标志识别,太赫兹医学成像和层析成像,可在生物和医学诊断与检测中得到广泛应用。尤其是在用于皮肤病和乳腺癌等的检测与诊断方面,国际上已取得了一定的进展。目前,太赫兹的近场成像技术已经使其分辨能力达到了波长以下的尺度,太赫兹显微成像的分辨力已经达到几十微米,能清晰地看到皮肤与乳腺中的肿瘤,从而可用于进行皮癌与乳腺癌的诊断。

此外,利用太赫兹射线的生物探头,可探测糖蛋白 avidin 和维生素 H 的混合物;太赫兹技术还能对烧伤进行探测,可对烧伤的深度及程度进行准确标定。

7. 可用于对食品的质量检测

人们的食品安全也很重要,太赫兹技术还可用于对食品进行质量检测。如在肉制品的检测中,因为瘦肉吸收太赫兹射线,而脂肪对太赫兹频带几乎是透明的,利用这种特性即可对肉制品进行质量检测;对塑料膜包装的食品,可用反射太赫兹波强度来测量其表面水分的含量,从而确定其新鲜的程度等。

除此之外,太赫兹技术还可用于大气污染检测,以及天文学的研究中等,这里就不一一叙述了。

由上可知,太赫兹技术是一门新的极具活力的前沿领域,其应用非常广泛。目前,世界各国均争相研究发展自己的太赫兹技术,我国也不例外。但总的看来,太赫兹技术的研究仍然处于初级阶段,还存在着许多亟待解决的问题。

随着科学技术的不断发展,现在太赫兹技术领域的新理论、新现象、新方法和新应用层出不穷,太赫兹系统已经实现了小型化。脉冲太赫兹辐射能够在最短的时间内提供宽带光谱数据,通过探测脉冲的回声(采用类似于雷达的方式),可以获得样品的深度信息。连续太赫兹辐射,能够提供日益增长的频率分辨率,因而可用于测量较窄的光谱特征。目前,连续太赫兹辐射使用的激光器要比现有的昂贵的飞秒激光器价格低廉。

显然,太赫兹技术是在成像、光谱、通信、安防等这些具有巨大潜力应用的前沿技术,目前人们对它们的期望已经超过了现有的技术可行性。那些基于 DFB 二极管激光器,以及正在进一步研究的飞秒光纤激光器的光电技术,有望为太赫兹波提供更广阔的应用商机。相信不久,经过安防科技工作者的努力,太赫兹技术自然会在安全防范领域中大显身手。

6.5.4 光信息调制传输技术在安防中的应用

光信息调制传输技术在安防监控系统中的应用很广,因为只有在发送端把信息经过调制后,再把这种调制光作为载波进行传输,才能抗干扰,而在接收端最后解调出信号来。

1. 用于主动红外对射的周界报警系统

如广州天网安防科技有限公司的新型远距离红外线幕墙。它采用数字通信原理对于波长为

940 nm 的红外射束进行编码调制,形成多光束、严密的隐形防范。当物体阻断任意相邻两根射束 ≥ 20 ms(相当于国际级短跑运动员冲刺速度)时,即可触发输出报警信号,并不会由于飞鸟、昆虫等飞过而引发误报警。在红外线射束附近从事正常活动的人员/物体的活动也均不会触发报警,特别适用于院落面积狭小的特定环境使用,因而具有占用最小地面面积的优点。

由于用多根红外射束构成高约 2 m 的防范界面,因而构成了红外线幕墙,在人的奔跑、跳跃、贴地爬行、飞身等行为穿越防范界面时,都会触发报警。该系列产品于 2005 年获得国家强制性认证证书,是证书中唯一具有使用距离 60 m、100 m 覆盖的系列产品。由于该系列产品采用同步通信、自适应强度调节及自适应变换频率等多项专有技术,因而误报率较低。

该产品已成功应用于 2008 年北京奥运会 200 km 周界防范,故宫博物院紫禁城周界防范,以及多省监狱的周界防范。

2. 用于安防监控的远程传输系统

一般,各种各样的远程传输系统,均要将信号进行调制后传输,在安防监控领域也不例外。说得简单一点,如 DVR 与 DVS,以及网络摄像机,它们只有将视频图像信号经编码调制后,才能通过网络将信号传送到远端的监控中心。这就是为什么在监控中心要经过解调器解码后,才能使图像还原而上电视墙上显示出来的原因。

光电信息处理技术及其 在安防中的应用

人类为了扩展感觉器官和思维器官的功能,利用各种传感器及信息处理系统来获取、处理、传递和使用外界的信息。可以说,人们想得到任何一条新闻、一个数据、一幅图像等信息,都必须经过信息处理才能变为被人们所能利用的有用的信息。可见,没有信息处理技术,就不可能获得有用的信息。因此,光电信息处理技术是光电信息技术的关键组成部分。

图像是自然界中的物和物群,经可见光的照射由人的视觉系统所感知的景物。当然,任何数据场在空间的有序排列都可转化成可视图像。显然,图像是信息表征的绝好形式,其直观性和易理解性是显而易见的,是其他类信息所不能比拟的。

随着信息化进程的飞速发展,作为信息最佳代表形式之一的图像,以及图像处理理论与技术,更加显示出其不可替代的重要地位。在日常生活、工农业生产、科学研究、交通运输及安全防范、医学、生物学、国防建设中,图像处理及其应用司空见惯。图像及图像处理是众多学科领域的交叉点和融合点,光电图像信息处理技术逐步向其他学科领域渗透并为其其他学科所利用,是科学发展的必然趋势,因为它与国计民生紧密相连,已经和将要给人类带来巨大的经济效益。本章着重讨论研究的是光电图像信息处理技术,并且细分讨论光电图像信息处理技术概论、光电图像处理-视频图像处理、安防中常用的视频内容检索技术,以及相关智能处理技术中的视频运动目标的检测识别与行为理解(即行为识别)。

7.1 光电信息处理技术概述

光电信息处理是一门研究以光子为主要载体对信息进行处理科学分支,是光电子学的一个主要研究领域。早在20世纪60年代初,由于从发射相干光的激光器的问世,以及记录和再现三维波面的全息技术的发明,使得光子不仅作为零维信息的载体,而且作为多维信息的相干载体变为现实。同时,也为信息的光子直接处理,开辟了实质意义上的新途径,并显示出光子比电子处理的无以比拟的优点,从而开拓和迅速地发展了以图像处理为主要内容的光电信息处理学科。

7.1.1 光电信息处理的特征方法和目标

1. 光电信息处理的特征与方法

近十年来,由于通信和计算的需要,光电信息的处理也从模拟量向数字量转化;光电信息的传递从空不变到空变交换转化;由于微电子工艺的渗入,光学元件的制作从单个冷加工工艺向大批量复制工艺转化;由于半导体光电器件的发展,光学分立式块结构器件向集成化微结构器件转化等。这些变化,促使光电信息处理技术成为研究内容广泛、目标明确并涉及光学、通信学、计算机学、微电子学、材料学、生物学等的一门交叉性高科技学科,并且可充分利用光子作为信息载体所具有的高速、高效率、高并行能力等,以完成信息处理的诸多功能。由此可见,模拟化处理、数字化处理、模拟和数字混合处理和微结构化处理,是当代光电信息处理的主要技术特征。

以光子为载体对信息进行加工处理,从微计算机角度看,主要可分为硬件和软件处理两种方式,如图 7-1 所示。由图可知,光电信息处理方式充分发挥了光学处理和电学处理的综合优势,并避免了各自处理的弱点。

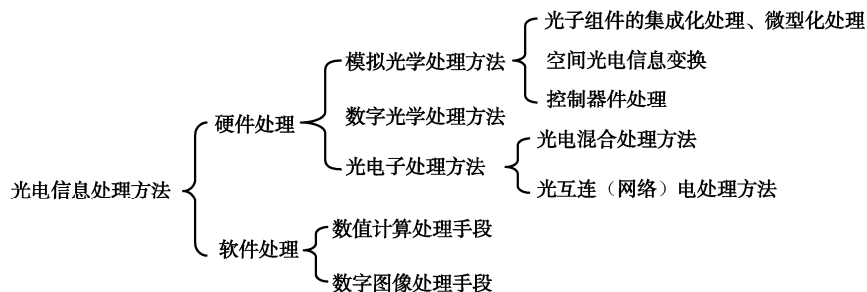


图 7-1 光电信息处理方法

2. 光电信息处理的目标

众所周知,图像处理的目的是改善图像质量,提取有用信息,识别预定目标等。从目前信息设备、信息科学技术发展的趋势看,光电信息处理具有如下目标。

(1) 不断提高信息处理技术水平,提高空间成像分辨能力。这个目标是:高分辨率、高显示质量;高速度、短处理时间;多维化,三维、四维或更多维;智能化,提高信息识别能力;标准化,便于信息交换、资源共享等。

人眼的能见距离是有限的,一般最远能看清几千米外的目标,再远则只能借助于望远镜。在探测技术上,使用空间分辨力来度量对远距离目标的分辨能力,如角分辨率(目标尺寸相对于观测者距离的张角),它在成像仪器里是每个像元的张角,在 1 km 处,一个像元对应的尺寸为 1 m 时,该张角为 1 mrad (1 毫弧度)。同样,在 1 000 km 处,1 m 的分辨力为 1 μ rad (1 微弧度)。20 世纪 80 年代美国为政治需要,搞星球大战(SDI),大力发展信息获取技术,要在几万千米处对飞行中的导弹头成像。显然,这是目前人类提出的最高级的探测能力。

(2) 要与多学科结合,重在应用。如与仿生学密切结合,21 世纪又是生物世纪和海洋世纪,研究模仿陆地和海洋生物的特异功能,造福人类。光电信息处理技术致力于应用,将其广泛地应用于国家(包括军事)的各行各业是其自身发展的最高要求和最好途径。



(3) 将对“无纸社会”的形成起促进作用。由于光电信息处理技术推动信息传输、处理、存储和显示技术的进步,用纸上文字来传递、存储和显示信息的功能将大为减弱,同时加快了传递、存储、检索、复制和显示信息的速度。显然,这对文化、教育、科技、医学和宣传等有重要意义。

总之,光电信息处理技术紧跟信息处理技术的前沿,扩展人类的信息器官和思维器官的功能。特别是信息获取与处理技术的发展,使人类对外部世界看得远(超视距本领)、看得清(空间分辨、光谱分辨和立体分辨本领)、不受阻挡(穿透云雾或物体本领)、识别能力强(信息处理技术),把人类获取外界信息的能力提高到空前的高度。

7.1.2 图像数字化及其分析处理的方法和内容

1. 数字图像及分析的基本方法

为使计算机能对图像进行处理,必须将模拟图像转化为数字图像。一幅数字化后的图像,其数据量是 M (每行像素数) $\times N$ (每列像素数) $\times b$ (灰度量化所占用位数) 比特。一幅 $M \times N$ 个像素的数字图像,其像素的灰度值可用 M 行 N 列的矩阵来表示。这样,对数字图像的各种处理就变成对矩阵的各种运算。

一幅 $M \times N$ 个像素的数字图像,在算法语言中,可用一个 $M \times N$ 的二维数组 IP 来表示,数字图像各像素的灰度值可按一定的顺序存放在 IP 数组中。习惯上,把数字图像左上角的像素定为 $(1, 1)$ 个像素,右下角的像素定为 (M, N) 个像素。这样,从左上角开始,第 I 列、第 J 行的第 (I, J) 个像素值,就存储到数组元素 $IP(I, J)$ 中。数字图像中的像素与二维数组中的各元素便一一对应起来了。二维数组就是数字图像在程序中的表现形式。

一般,对图像进行分析的基本方法有如下两种。

(1) 直方图。设图像的灰度等级范围为 $0 \leq i \leq M-1$, h_i 表示灰度级 i 出现的相对频率,显然 h_i 是 i 的函数, h_i 称为图像的直方图,即

$$h_i = n_i / n_t \quad (7-1)$$

式中, n_i 是灰度级为 i 的像素数, n_t 为图像的总像素数。如果将图像看成各态历经的随机过程,则 h_i 就是图像灰度概率密度函数的估计值。

对一幅数字图像,若对应于每一个灰度值,统计出具有该灰度值的像素个数,并据此给出像素-灰度值图形,则该图形就是图像的灰度直方图,如图 7-2 所示。直方图是一幅图像全部或部分相同亮度值像素的统计分布图。

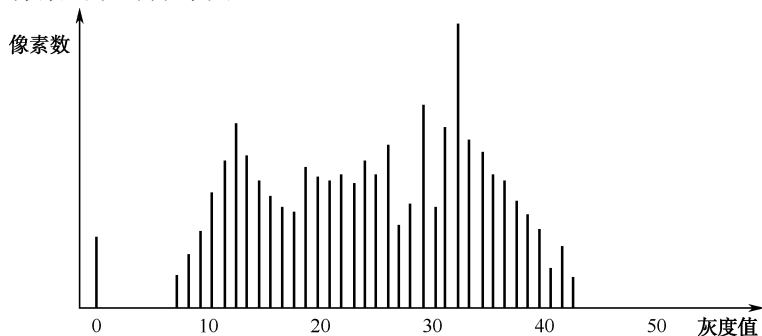


图 7-2 直方图示例

由图 7-2 可看出, 图像总的亮度和对比度情况, 以及图像像素值的动态范围等一系列图像的特征信息。值得注意的是, 一幅图像对应于一个直方图, 但一个直方图可能对多幅图像。直方图是分析图像信号统计特性的最常用方法。所以, 直方图是图像处理中的一个很有用的工具。如可设法改变图像像元的灰度分布状况, 可使整幅图像的灰度分布趋于均匀, 或者趋于所希望的某种分布, 从而使得原来模糊的图像变得清晰可辨。

直方图技术包括直方图均衡与直方图定义技术, 虽然直方图均衡化大大地改善了图像, 但它得到的图像的对比度常常偏高。由于直方图定义技术的灵活性, 可得到更加柔和、清晰的结果。尤其在图像已经退化和为了获得好的增强效果而必须控制像素分布的情况下更是如此。如果希望观察图像各个局部细节时, 还可采用局部直方图技术来实现图像的局部增强。

(2) 信源熵。计算图像的信源熵是分析图像统计特性的另一种常用方法, 例如在分析运动补偿效果时, 常用原始图像的熵与预测误差图像的熵进行比较, 结论是预测误差图像的熵值越小, 运动补偿预测性能就越好。

设图像的灰度等级范围为 $0 \leq i \leq M-1$, 则图像的熵为

$$H(X) = -\sum_{i=0}^{M-1} P_i \log P_i \quad (7-2)$$

式中, P_i 是灰度为 i 时的概率, 对 8 比特/像素, 其 M 值为 256。图像熵表示图像像素的平均比特数。

2. 数字图像处理的主要内容

数字图像处理包括以下主要内容。

(1) 预处理。在研究图像时, 必须先对获得的图像进行预处理, 即要滤去干扰、噪声, 作几何、彩色校正等, 这样可提高信噪比。

几何处理包括图像的放大、缩小、旋转、移动, 多幅图像配准, 图像的校正, 图像的周长、面积、体积的计算等。

(2) 图像增强。图像增强是数字图像处理中最简单和最具有吸引力的领域, 也是数字图像处理中非常主观的领域, 主要是显现那些被模糊了的细节或突出一幅图像中感兴趣的特征, 或是增强图像的对比度, 使其看起来好一些。

图像增强不考虑引起图像降质的原因, 而是突出图像中所感兴趣的部分, 如提高图像高频分量, 可使图像中物体轮廓清晰, 细节明显; 强化低频分量可降低图像中噪声的影响。

图像增强处理包括按需要将图像进行轮廓增强、灰度增强或作伪彩色处理, 以提高对图像的辨识能力。总之, 增强的目的是为了提供一个满足一定要求的图像, 或者对图像进行变换, 以便分析。

(3) 图像复原与重建。为了给观察者以清晰的图像, 还要对图像进行改善, 即进行复原处理, 也就是把已经退化了的图像加以重建或恢复的过程, 以便改进图像的保真度。

图像复原也是改进图像外貌的一个处理领域, 但不像增强是主观的, 图像复原是客观的。在某种意义上说, 复原技术倾向于以图像退化的数学或概率模型为基础, 而增强则以怎样构成好的效果这种人的主观偏爱为基础。

图像复原或恢复的目的是尽可能恢复图像本来面目, 它是对图像整体而言。在复原处理时必须研究图像降质的原因, 以便根据降质过程建立降质模型, 再采取相应的措施, 如采用某种滤波方法, 恢复或重建原来的图像。例如, 由于某种原因使摄取的图像有几何失真, 或由于被



摄取的物体和摄像设备有相对运动而造成的模糊图像,这就需要进行各种校正处理,以恢复为原来不失真的图像。这些处理,在遥感电视图像上已被广泛地应用。

图像重建是图像处理技术在另一方向的发展,它是对一些三维物体,应用 X 射线、超声波等物理方法获取物体内部结构数据,再将此数据进行运算处理而构成物体内部某些部位的图像。最成功的实例是计算机断层扫描成像技术,俗称 CT 技术。

(4) 图像分割。图像分割是将一幅图像划分为组成部分或目标物,是将图像中包含的物体按其灰度或几何特征进行分割,即将图像中有意义的特征部分提取出来。这些有意义的特征包括图像中的边缘、区域、纹理等,这是进一步进行图像处理如模式识别、机器视觉等技术基础。

通常,自主分割是数字图像处理中最为困难的任务之一。分割越准确,识别越成功。将图像进行分割处理,就是进行定位和分离,以分出不同的信息,即从中提取有效分量或数据等有用信息,而便于进行图像识别、分析和理解。随着图像处理应用领域的不断扩展,对图像分割的研究还在不断深入,因而是目前数字图像处理研究的热点问题之一。

(5) 图像编码压缩。图像编码压缩是适应信号传输通道和压缩图像信号传送频带(或数码率)的处理。图像编码是利用图像信号的统计特性、人类视觉的生理学及心理学特性对图像信号进行编码,编码是压缩技术中最重要的方法,是在图像处理技术中发展较早且比较成熟的技术。研究图像编码压缩技术的目的是:

- 减少数据存储量。
- 降低码流以减少传输带宽。
- 压缩信息量,便于识别和理解。

图像编码压缩技术可以减少描述图像的数据量,以便节省图像传输、处理的时间和减少所占用的存储器容量。压缩可以在不失真的前提下获得,也可以在允许的失真条件下进行。当前,已出现很多压缩编码的方法,如 MPEG1/2/4、M-JPEG、H263/264、Wavelet 等。

(6) 图像描述。图像描述是图像识别和理解的必要前提,表示与描述几乎总是跟随在分割步骤的输出后边,通常这一输出是未加工的数据,其构成不是区域的边缘(区分一个图像区域和另一个区域的像素集),就是其区域本身的所有点。

一般,图像描述方法采用二维形状描述,有边界描述与区域描述,即必须首先确定数据是应该被表现为边界还是整个区域。当注意的焦点是外部形状特性(如拐角和曲线)时,则边界表示的图像描述是合适的;当注意的焦点是内部特性(如纹理或骨骼形状)时,则区域表示的图像描述是合适的。在某些应用中,这些表示方法是互补的。

描述也叫作特征选择,涉及提取特征,该特征是某些感兴趣的定量信息或是区分一组目标与其他目标的基础。对于最简单的二值图像,可以采用其几何特性描述物体的特性。对于特殊的纹理图像,多采用二维纹理特征描述。

随着图像处理技术研究的深入发展,现已进行三维物体描述的研究,并提出了体积描述、表面描述、广义圆柱体描述等方法。目前,形态学处理涉及提取图像元素的工具,它在表现和描述形状方面非常有用。

(7) 图像分类与识别。图像识别属于模式识别的范畴,其主要内容是在图像经过某些预处理(压缩、增强、复原)后,再将图像中所需物体的特征进行分割、选择、然后进行判别分类。

图像分类是图像处理技术的深入和发展,常采用经典的模式识别方法,有统计模式分类和句法结构模式分类,近几年新发展起来的模糊模式识别和人工神经网络模式分类在图像识别中也越来越受到重视。

识别, 实际上是基于目标的描述, 是给目标赋以符号的过程。

(8) 图像理解。图像理解是由模式识别发展起来的, 其处理过程的输入是图像, 输出是一种描述。这种描述并不仅是单纯的用符号做出详细的描绘, 而且要根据客观世界的知识, 利用计算机进行联想、思考和推论, 从而理解图像所表现的内容。

图像理解有时也称为景物理解, 在这一领域还需要进行深入研究。

7.1.3 安防监控图像处理的基本方法——像素处理

由于图像是由像素构成的, 所以很多情况下是对像素直接处理的, 像素处理又可分为点处理和区处理。这种像素处理的方法, 也常用于安防监控图像的处理。

1. 图像的点处理

图像的点处理又称为直接对原像素值进行处理, 是一种最基本的图像处理操作, 算法比其他算法简单。点处理算法是指仅根据图像中像素的原值(有时还要考虑该像素在图像中的位置)按一定规则(或变换)来确定其新值的一种算法。也就是说, 单个像素的新值仅仅依赖于该像素原值的大小。由于像素原值与新值之间算法上的这种联系, 点处理算法一般是可逆的, 并采取逐点扫描图像像素的方式来完成各像素的变换处理。

由于点处理变换是一种仅仅依赖于像素原值的变换, 所以这种变换过程可借助于查找表(LUT)来快速实现。如果点处理算法中还要考虑像素的位置, 则除了查找表外, 还要用到计算公式。一般地, 点处理算法并不改变一幅图像中各像素之间的空间关系, 因而点处理算法不能用于修饰图像中所包含的细节。

点处理仅是用输入像素值产生输出像素值, 它是图像处理最简单最有效的方法。点处理的应用包括图像灰度变换、色度变换、直方图分析等。下面讨论点处理方法实现的图像亮度调整、图像亮度反置、图像阈值化、图像对比度拉伸、图像伪彩色处理等图像处理算法。

(1) 图像亮度调整。这是一种点处理, 处理时对图像中每个像素加上(或减去)一个常数。设像素亮度为 I , 则变化按式(7-3)进行。

$$I=I+b \quad (7-3)$$

式中, b 是亮度常数, 可为正数或负数。若 b 为正数, 则像素亮度增加; 若 b 为负数, 则像素亮度减少。

(2) 图像亮度反置。类似于根据照片制作负片一样, 是一种很简单的点处理技术。用这种方法对图像进行处理后, 图像亮的部分变暗, 暗的部分变亮, 较亮的部分变成较暗, 较暗的部分变成较亮。其处理方法是: 用可能的最大像素值减去像素的值作为该像素的新值。图像中最暗的部分, 其像素值为 0, 处理后变成最亮的部分, 其像素值为 63; 反之, 图像中最亮的部分经变换后反置成最暗的部分。

(3) 图像阈值化。这是一种将连续色调图像变成黑白图像的方法。其基本思想是使像素值小于指定阈值的像转换成黑像素, 像素值等于或大于指定阈值的像素转换成白像素。这一方法在诸如桌面印刷、机器视觉等领域都有广泛的应用。

在机器视觉领域内, 对图像进行边缘检测之前, 一般先对其进行二值化处理。在这种情况下, 阈值处理能够消除图像中那些可能会干扰边界检测处理的信息。正确地选择阈值很重要, 它可保证在阈值处理中不至于损失太多的信息。



(4) 图像对比度拉伸。一幅图像的对比度与该图像中亮的部分和暗的部分的分布情况有关。当一幅图像大部分区域都很亮或大部分区域都很暗时,该图像显示出对比度低的特点;而当一幅图像中较亮的部分与较暗的部分所占比重相当时,该图像显示出对比度高的特点,连续色调图像只有充分利用所有灰度色调范围,才能显现出对比度高的特点。

直方图是检查图像对比度的一个理想工具,因此,通常将直方图与对比度拉伸点处理算法配套使用,以增强图像的对比度。进行对比度拉伸时,需要先用直方图来判定低对比度图像中像素值的分布主要集中在哪个区域。一般地,这个区域周围往往有像素值没有用的区。为了拉伸对比度,需分别从直方图的左端向右(即 $0\sim 63$)和右端(最大像素处)向左(即 $63\sim 0$)扫描直方图,分别找到超过给定阈值的第一个像素。像素值小于较低的那个阈值的像素,其像素值置0,像素值大于较高的那个阈值的像素其像素值置63。像素值介于两个阈值之间的像素,按比例放大,使其填满 $0\sim 63$ 区间,经过上述处理后的图像较好地利用了整个灰度范围,视觉效果亦明显改善。

(5) 图像伪彩色处理。它是用色度来代替像素灰度值的一种技术,即将黑白图像变为彩色图像,并用不同的色彩来代替黑白图像的不同灰度等级,以达到图像增强的目的。这样做是基于人眼对彩色的分辨率远远高于对灰度的分辨率,因为一般人对于黑白的图像只能觉察出几十种灰度变化,但却能分辨出几百种甚至上千种不同光强的色彩。将黑白图像用彩色显示的图像进行处理,是非常有效而实用的,例如,有一幅电灯灯丝图像,已知像素与温度有一定的关系,可利用伪彩色技术来区分不同的温度,如最高温度可用红色表示,较低一些的温度可用绿色表示,最低温度用蓝色表示。经过伪彩色处理后的图像总的信息量保持不变,但是其温度信息对人眼就变得更加直观了。

伪彩色处理技术有密度分割法、灰度级到彩色的变换法、滤波法。后两种处理技术实现起来要困难一些,但效果要好得多。由于这些方法介绍较多,这里就不再一一叙述。

2. 图像的区处理

所谓图像的区处理,是指对成组的多个像素进行处理,经过某种变换处理后,得到图像中某一点的像素值。区处理变换中采用的像素组称为邻域,邻域一般是由像素组成的二维矩阵,该矩阵每一维的大小均为奇数。中心像素(即所谓感兴趣的像素)位于邻域的正中央,变换后中心像素的值将被经过一定算法计算得到的新值所代替。邻域中心像素周围的那些像素值在二维方向上提供了图像的亮度变化趋势信息,在大多数区处理中要用到这些信息。

这种亮度变化的趋势信息就是空间频率。空间频率定义为像素的亮度在一定距离上的变化速率。一幅图像空间频率具有垂直和水平两个分量。一幅具有高空间频率的图像通常是在很短的距离内其像素值有急剧变化。例如,一幅黑白相间的棋盘图像其空间频率就很高,棋盘的方格越小,图像的空间频率就越高。一幅空间频率低的图像其像素值通常保持不变或者变化缓慢,如云的图像其空间频率通常很低。

由于区处理能对空间频率信息进行处理,所以区处理可用来减缓或增强图像中某些特定的频率分量。正因为如此,大多数区处理都属于空间滤波器。空间滤波在图像处理中有很多应用:如可提取图像特征(边界增强和检测),进行图像锐化、图像平滑、图像模糊及去除图像中的随机噪声等。

区域处理是使用输入像素中的每个像素值产生输出像素值,典型应用包括离散卷积运算、

图像变换、图像滤波、边缘检测等。下面介绍三个区处理算法：卷积、中值滤波和 sobel 边缘检测。

(1) 卷积处理。卷积是一种用途很广的算法，可用卷积来完成各种区处理变换，如低通空间滤波、高通空间滤波、边缘增强、图像模糊等。

理解卷积的一种最好的方法是将它看作加权求和的过程。邻域中的每个像素（假定邻域为 3×3 ）大小，其卷积核大小与邻域相同（参见图 7-3），它分别与卷积核每个元素相乘，乘积求和所得结果即为中心像素的新值。卷积核中的元素称为加权系数（亦称为卷积系数），卷积核中的卷积系数的大小及排列顺序决定了对图像数据进行区处理的类型。改变卷积核中的加权系数，会影响到总和的数值与符号，从而影响到所求像素的新值。

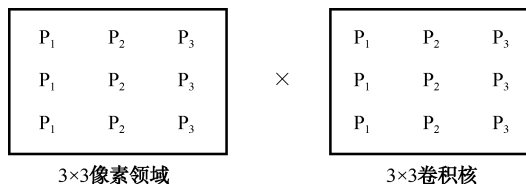


图 7-3 卷积过程示意图

图 7-4 给出了几种不同卷积核及其代表的各种变换。从图中可看出，大多数常用的卷积核都是 3×3 的，所有卷积核的行数和列数均为奇数，这些格式的卷积核已经成为工业标准，加大卷积核可使卷积处理更为灵活。从应用角度可不考虑构成这些卷积核背后的复杂数学理论，而直接使用这些卷积核，来解决所面临的实际问题。

低通空间滤波器									高通空间滤波器								
1/9	1/9	1/9	1/10	1/10	1/10	1/16	1/8	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16
1/9	1/9	1/9	1/10	1/5	1/10	1/8	1/4	1/8	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16
1/9	1/9	1/9	1/10	1/10	1/10	1/16	1/8	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16
LP1			LP2			LP3			HP1			HP2			HP3		
			Σ=1									Σ=1					
拉普拉斯边缘增强																	
			0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-2	1			
			1	-4	1	-1	8	-1	-1	9	-1	-2	4	-2			
			0	1	0	-1	-1	-2	-1	-1	-1	1	-2	1			
			LAP1			LAP2			LAP3			LAP4					

图 7-4 几种不同的卷积核(除了 LAP3 外，其余卷积的卷积系数之和均为 0)

① 低通空间滤波器。低通空间滤波器是一种保留图像低频成分，减少图像高频成分的处理算法。低通空间滤波器可用来降低图像中的视觉噪声，也可用来除去图像中的高频成分，以便更好地观察图像的低频成分。这是因为除去图像的高频成分后，图像中的那些不明显的低频变化就更容易识别了。低通空间滤波器的频率截止点由卷积核的大小及卷积系数决定。图 7-4 给出了三种不同的低通空间滤波器卷积核。

应该注意到，所有的低通滤波卷积核，其卷积系数之和均为 1，这一点对于理解低通滤波器的工作原理很重要。对图像中没有高频成分的区域来说，这个区域中的像素值应该保持不变或者变化缓慢。当用一个低通滤波器对这个区域进行卷积时，加权系数与邻域像素分别相乘并求和，即可得到邻域中心像素的新值。如果邻域中所有像素的值都相同（保持恒定不变），则中心像素的新值与原值相同。这就是为什么加权系数和为 1 的原因，即卷积处理后保留了图像



的低频部分。当卷积核移到图像的高频区域时,像素值的任何快速变化经过卷积计算,与邻域中其他像素取平均,这样就降低了高频成分。从视觉效果来看,图像经过低通滤波器处理后,显得有些模糊。这种现象的出现,是由于削弱了图像的高频成分,像素值的突变被平均值所代替的缘故。

② 高通空间滤波器。当需要观察图像中具有高频成分之目标时,可采用高通空间滤波器对图像进行处理,处理后的图像中,频率较高的部分更突出了,而频率较低的部分被削弱了。图 7-4 给出了三个高频滤波器的卷积核。在高频滤波器中卷积核中心点的值最大的那个卷积系数起着关键的作用。当这个卷积系数经过图像中的高频部分(即灰度值有突变部分)时,由于卷积核中心点卷积系数很大,所以与像素值相乘后,在卷积结果中占了很大的比重(卷积核中除中心点以外其余各负的卷积系数值只是对上述放大效应起一些削弱作用),卷积结果是使已有的灰度突变变得更突出。也就是说,经过处理后,图像中像素值间的灰度差得到增强,而对像素值较恒定的区域则保持不变。也就是说,图像中像素值变化不大的区域(低频成分区域)不受此变换的影响。

③ 拉普拉斯边缘增强。采用卷积方法的另一种区处理就是边缘增强,在对图像进行特征提取之前,一般要进行边缘增强,然后进行二值化处理,以提取图像特征。边缘增强算法处理的目的是要突出图像的边缘。常用的边缘增强算法之一是拉普拉斯边缘增强算法。

拉普拉斯边缘增强算法是一种各向同性的增强算法。即其边缘的增强程度与边缘的方向无关。不论图像灰度梯度是正的还是负的,拉普拉斯边缘增强方法都能使边缘得到增强。

函数 $f(x,y)$ 的拉普拉斯变换,其数学表达式为

$$L\{f(x,y)\} = d^2 f/dx^2 + d^2 f/dy^2 \quad (7-4)$$

式中, $d^2 f/dx^2$ 是 f 相对于 x 的二次偏导数, $d^2 f/dy^2$ 是 f 相对于 y 的二次偏导数。对于离散函数来讲,二次偏导数可近似地用差分表示为

$$\begin{aligned} d^2 f/dx^2 &= f(x+1) - 2f(x) + f(x-1) \\ d^2 f/dy^2 &= f(y+1) - 2f(y) + f(y-1) \end{aligned} \quad (7-5)$$

因此,拉普拉斯变换可近似地表示为

$$L\{f(x,y)\} = f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y+1) + f(x,y-1) - 4f(x,y) \quad (7-6)$$

式(7-6)等效于一个与 $f(x,y)$ 作卷积运算的卷积核。卷积核可写成

$$P(x,y) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7-7)$$

(2) 中值滤波。中值滤波是一种区处理方法,但是它不属于卷积。中值滤波也是一种根据邻域中各像素的值来决定中心像素值大小的方法。但是,它并不需要根据邻域值用算术方法计算出新像素值,而是一种按邻域中的像素排序后的中位像素(即排序后处于正中的那个像素值)作为中心像素新值的方法。

经过中值滤波后,图像中的随机噪声将被有效地消除。这是因为邻域中亮度值发生随机突变的像素,经过排序后,要么排在队列的队首,要么排在队列的队尾;而中心像素的新值,是取自队列中位的那个像素值。理论与实践证明,许多图像经过中值滤波处理后,都能得到较好的视觉效果。

(3) Sobel 边缘检测法增强。Sobel 边缘检测算法,是一种非线性边缘检测算法,该算法效率很高,而且用途很广。Sobel 边缘检测算法中计算两个不同的卷积核,即

$$x \text{ 方向使用卷积核} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, y \text{ 方向使用卷积核} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (7-8)$$

计算检测出来的边界强度和方向为

$$\text{强度} = \sqrt{x^2 + y^2}, \text{方向} = \arctan(y/x) \quad (7-9)$$

用 Sobel 边缘检测算法对图像中每一个像素进行处理后,得到的输出图像通常还要进行阈值化处理。当中心像素新值(即所计算的差值绝对值的最大值)等于或大于给定的阈值时,输出像素为白;当如小于给定的阈值,则输出像素为黑。经过 Sobel 算法和阈值处理后,最后的结果是一幅只包含边缘信息的黑白二值图。

3. 图像的帧处理

图像的帧处理是用视频信号的前后帧(一帧或多帧)来处理本帧,它广泛应用于视频压缩中,如运动补偿、帧内插等详情可参阅本书参考文献[5,10]等,这里就不详述了。

7.2 光电图像处理-视频图像处理

7.2.1 光电图像处理的优势

光电图像处理,是光电成像技术与数字图像处理技术的结合,如图 7-5 所示,由图可看出,光电成像技术是自然界图像到数字世界图像的桥梁。光电图像处理是基于光电成像技术与计算机技术的图像处理,因而其计算精度高、灵活性好、适应性强。

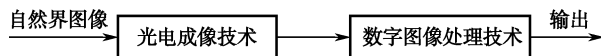


图 7-5 光电图像处理

1. 光电成像技术的优点

大家知道,光电成像技术具有以下两大优点。

(1) 能弥补人类的视觉缺陷。这些视觉缺陷是:

- 视见光谱域有限,只能看见可见光,看不见红外线、紫外线、X 射线图像。
- 视见灵敏域有限,光线太暗的地方能见度不高。
- 视见分辨率有限,只能分辨到 $1'$,目标太小看不清。
- 对视觉信号无记忆能力。

(2) 能扩展人类自身的视觉功能。其有效地扩展的视觉功能是:

- 可扩展人眼对微弱光图像的探测能力。
- 可开拓人眼对不可见辐射的接收能力,如可观测到红外线。紫外线与 X 射线所摄的图像。
- 可捕捉人眼无法分辨的细节,如分辨到 1。
- 可将超快速现象存储下来等。



2. 计算机数字图像处理技术达到的目标

通过数字图像处理技术，又可达到如下目标。

(1) 改善图像视觉效果：即改善图像质量，给人类提供更好的图像，以供观察者使用，如其应用领域有电影、电视、视频监控、遥感、检测等。

(2) 作为机器视觉：使计算机具有与人一样的视觉功能，因为图像处理的结果是给机器用的，所以图像处理的输出可能不再是图像，而是抽象的符号，其应用领域有目标识别等。

因此，光电图像处理是计算机系统通过光电成像系统（光学系统与光电成像器件等），将自然界的模拟图像转变为计算机中的数字图像，进而对这种图像进行所需的各种处理、分析与识别的。由于光电成像器件输出的是视频图像信号，因而光电图像处理，也称为视频图像处理。

7.2.2 视频标准

视频 (Video) 指动态图像 (Moving Image)，可认为随时间变化的静态图像系列 (Still-Frame Image/Picture Sequence)。在静态图像中，信息密度随空间分布，且相对于时间为常量；而动态图像的空间信息密度特征随时间变化。

视频图像的数学表达式的一般形式可以写成 $S(x,y,t)$ ，其中 x, y 为空间变量， t 为时间变量，而 S 为对应于时空点 (x,y,t) 的光度学物理量。如果采用 RGB 体系来描述，则完整的数学表达式可写成

$$R=S_R(x,y,t), \quad G=S_G(x,y,t), \quad B=S_B(x,y,t) \quad (7-10)$$

当 RGB 为模拟信号时，我们称它为模拟视频。如果对 RGB 进行了数字化，就称为数字视频，这与模拟静态图像和数字静态图像的概念是基本相似的，但模拟视频和数字视频要比模拟静态图像和数字静态图像的关系与差别复杂得多。目前，视频处理技术基本上都是基于数字的，但其来源和历史则是模拟的，因此需要对模拟视频图像的基础，即视频标准作一个简单介绍。

通常，人们眼睛看到的动态图像，就是连续的二维空间时基光度信号。在工业上，最先记录 and 显示的也是连续的时空图像。尽管人眼直接感受的物理量是每个时刻每个空间位置的 RGB 三色刺激值，但是由于技术实现的限制，只能记录部分时间的部分信号，因此对实际的物理量进行了变换和选择，这就形成了现在通用的模拟视频标准。

1. RGB 与 YUV、YIQ、YCrCb

RGB 色度空间可以比较准确地描述图像的光度特性，但是 RGB 在数值和技术操作实现上有一些不利的特点，不利于物理记录和传输，所以在模拟视频体系上采用了 YUV、YIQ 或 YCrCb 体系。它们在数学上是正交变换，在物理上是等效的。

在 RGB 中，三个分量是平等的，要传输彩色信号，必须传输 RGB 三路信号。这在应用上是不经济的，因此人们把 RGB 转化为亮度和色差信号。亮度信号对人的感觉更重要，因此用一路独立的信号，而把色差信号进行亚取样（间隔采样），合在一路信号中传输，这就形成了 YUV 色系。用 Y 表示亮度信息，而用 $U=R-Y$ 和 $V=B-Y$ 表示色差信息。

$$\begin{aligned} Y &= -0.299R + 0.587G + 0.114B \\ U &= -0.701R - 0.587G - 0.114B \\ V &= -0.299R - 0.587G + 0.886B \end{aligned} \quad (7-11)$$



YUV 体系广泛应用于 PAL 电视制式中。

在 NTSC 制式中，由于色差的编码方案不同，因此采用了 YIQ 体系。 Y 不变，而 I 、 Q 可以分别由 U 、 V 旋转 33° 来得到，即

$$\begin{aligned} Y &= 0.299R + 0.587G + 0.114B \\ I &= 0.596R - 0.275G - 0.322B \\ Q &= 0.211R - 0.523G + 0.312B \end{aligned} \quad (7-12)$$

在以演播室高质量为目的的 CCIR601 标准编码方案中，采用了 YC_rC_b 体系。同样， Y 不变， $C_r=0.713U$ ， $C_b=0.564V$ ，即

$$\begin{aligned} Y &= 0.299R + 0.587G + 0.114B \\ C_r &= 0.500R - 0.419G - 0.081B \\ C_b &= -0.169R - 0.331G + 0.500B \end{aligned} \quad (7-13)$$

由于 C_r 、 C_b 的复制范围与 Y 不一致，通常在数字图像处理时都加 128，即单字节数值的一半。例如，在 JPEG 压缩中进行编码和解码时，都加上了 128。

上述变换有两个目的：一是为了把亮度信号和色度信号分离，因为人眼对亮度比色度更为敏感，所以给予亮度信号更高的采样分辨率，以得到更佳的图像视觉效果；二是仅用亮度信号就可以代表黑白视频，做到彩色视频和黑白视频兼容，有利于信号的传输和处理。

2. 模拟视频制式

目前模拟视频格式已经标准化。世界各国采用的是 NTSC、PAL 和 SECAM 三大制式。由于 PAL 制式比 NTSC 制式优越，因此我国采用的是 PAL-D 制式。

3. 模拟视频参数

模拟视频参数较多，这里只介绍下面几个主要参数。

(1) 图像分辨率。图像分辨率实际是指图像有效行数与有效列数。图像行列数越多，图像分辨率就越高，在同样显示尺寸下，图像的细节就越多，画面就越清晰。例如，家用录像带和 VCD 的图像行数和列数均只有标准电视的一半，只是放大显示而已，所以画面不如标准电视清晰；而 DVD 的行列数与标准电视相同，因此比 VCD 清晰得多；高清晰度电视的行数、列数均达到当前标准电视的 2 倍，其画面清晰度和图像质量将比当前标准电视高得多。

(2) 取样方式。它是影响视频信号清晰度的参数。全取样是对每一个像元的 Y 、 U 、 V 都采样，三种样本数目相等。而亚取样指对 Y 、 U 、 V 进行部分取样，缺少的样本从邻域样本得到。电视图像采样格式如表 7-1 所示。

表 7-1 电视图像的采样格式

格 式	样 本	P_0 P_1 P_2 P_3	P_4 P_5 P_6 P_7	...
4:1:1	Y	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	...
	U	○ × × ×	○ × × ×	
	V	○ × × ×	○ × × ×	
4:2:2	Y	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	...
	U	○ × ○ ×	○ × ○ ×	
	V	○ × ○ ×	○ × ○ ×	

续表

格 式	样 本	P ₀ P ₁ P ₂ P ₃	P ₄ P ₅ P ₆ P ₇	...
4:4:4	Y	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	...
	U	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	
	V	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	
4:4:4	R	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	...
	G	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	
	B	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	

注：表中○表示采样；×表示不采样。

在 4:1:1 格式中，每 4 个连续取样点上，取 4 个 Y 的样本，而色差 U 和 V 则各取 1 个；在 4:2:2 格式中，每 4 个连续取样点上，取 4 个 Y 的样本，而色差 U 和 V 则各取 2 个；在 4:4:4 格式中，每 4 个连续取样点上，Y、U、V 全部取 4 个样本，称为全取样。显然，取样本数越多，图像分辨率越高。亚取样都会降低图像分辨率，也会减低数据量或信号带宽。

(3) 帧率。它是指每秒中更新的图像画面数，是视频最重要的参数之一。当帧率达到 15 帧/秒时，人眼已经感觉为基本连续的运动，因此计算机动画的最低帧率为 15 帧/秒；当帧率达到 24 帧/秒时，人眼感觉为连续运动，但是有闪烁感觉，所以电影使用遮光板方法。

在视频光栅显示时，只有帧率达到 50 Hz 时，才感觉不到闪烁，但是在高亮度和高饱和度区域，仍然可以发现闪烁现象。当图像分辨率提高时，每个光栅点的相对显示时间与总像元数目成反比减小，帧率的影响更为明显。所以在计算机显示器上，800×600 分辨率模式下，达到 70 Hz 的帧率也感觉到闪烁。在 1024×768 分辨率模式下，帧率需达到 85~100 Hz 时，才能消除闪烁感觉。正因为计算机显示器的帧率比标准电视高，没有闪烁，所以人们才能长时间在计算机显示器前工作，而眼睛没有长时间看电视那么疲劳。在以前，大屏幕电视机与计算机显示共用的技术一直没有实际推广的主要原因之一，就是帧率问题。当然也有图像画面的分辨率问题。目前，高清晰度电视标准的帧率已提高到 100 Hz。

(4) 图像深度。即画面图像的有效灰度级数目或颜色数目。在计算机显示中，现在都达到了 24 位的颜色数目（R、G、B 各 8 位）。在标准电视机上，大约只能达到 21 位（R、G、B 各 7 位，约 100 个灰度等级）。因此，在电视机上看 DVD 电影时，图像的层次和立体感觉与在计算机屏幕上观看有较大的差别。人们通过电视卡在计算机屏幕上看电视节目，要比直接在电视机上看感觉清晰和稳定得多，这是由于显示帧率、扫描方式和图像深度的差别引起的。

4. 视频信号接口

(1) RGB 接口。该接口具有独立 R、G、B 三个分量的通道。这种接口的质量最高，色度信号全部保留，没有损失。计算机 RGB 显示都采用这种接口，高级的视频显示器也有这种接口。

(2) S-VIDEO 接口。该接口具有亮度 Y 信号通道和色差 C 信号通道，Y 信号通道中包含场同步和帧同步信号，没有其他调制，所以亮度信号的清晰度和线性度很好。C 信号通道包含色载波同步信号，由于只有两路色差信号，所以质量也比较好。视频声音通过另一路 AUDIO 信号传输。因为 S-VIDEO 用亮度和色差信号独立传输，因此视频图像信号质量很好。现在的新型电视、VCD、DVD、摄像机和其他专业视频设备都有这种接口。

(3) AV 接口。该接口也称为复合视频接口,是一般的视频标准接口,只有一个信号通道。该通道把亮度信号、色差信号和场同步、帧同步及色载波同步信号复合在一起。接收端再分离出各种信号来显示。这种信号兼容性广,信号质量一般,基本上所有的视频设备都必备这种接口。而视频声音通过另一路 AUDIO 信号传输。

(4) RF 接口。即射频接口。在该接口中,把 VIDEO 和 AUDIO 信号调制在带宽为 10 MHz 的射频信号上,由一路信号传输所有的视频图像和声音信号。该信号通过电视机或录像机的射频天线口输入,不同的载波频段对应不同频道。该信号既可以通过无线电波传输,如电视发射塔;也可以通过电缆传输,如有线电视。一般来说,这种接口信号的质量比上述几种接口要差一些。

由于视频的带宽接近 10 MHz,因此不论 RGB 接口、S-VIDEO 接口,还是 AV 接口、RF 接口,都不适合于远距离传输。采用同轴电缆时,RGB 接口为几十米,S-VIDEO 和 AV 接口为几百米。增加放大器和高频补偿器,可以延长传输距离,但是也不超过几千米。目前远距离视频信号传输的最佳方案是光纤传输,包括有线电视的射频信号,可以达到几十千米甚至上百千米。

7.2.3 视频图像的特点及其处理的研究内容

1. 视频图像的特点

(1) 实时性。与静态图像相比,视频的信息是以时间为基线的,它不仅包含了二维空间信息,而且记录了事件的过程,因此视频图像的时间顺序是不能混淆的,帧率参数也直接反映时间变化过程的信息。

(2) 相关性。由于视频以较短的时间间隔记录空间二维图像信息,因此相邻帧图像很相似,甚至相同,也就是说相邻帧图像的相关系数很大。基本上所有的视频图像处理都以该特性为基础。

(3) 多参数转换性。以视觉效果为主要用途的视频,许多参数并不都同时要求高指标,往往是某个方面的指标要求高时,其他的指标就不需要很高。

对视觉生理心理学的深入研究表明,视频图像的细节、灰度及运动三个分辨率参数之间实质上是相互依赖的。如果能充分地利用人的生理特性,适当地降低对某些参数的分辨率要求,就可望进一步降低数码率或带宽。电视图像最终是给人观看的,而人的视觉在某些条件下往往可以容忍一些失真,有些失真人眼又根本辨别不出来,因此,超过视觉分辨能力的高保真度要求就没有必要。这些参数转换包括如下几种。

① 空间-灰度分辨率变换(即 P - R 转换) 视觉生理心理学实验表明,人眼仅在观察图像中的大面积像块时,才能分辨出全部 256 级灰度等级;而当观察图像中的小块区域或精微细节时,只能分辨出不多的灰度级。因为在急剧的黑白跳变处,人眼分辨不出灰度差别。图像的空间细节分辨率和灰度分辨率之间的这种视觉生理、心理学关系,可用 P - R 平面上的双曲线表示;因此,对于图像中的平坦区域可以降低取样率,但要保持每一样本有较多的灰度等级;反之,对于图像中的边缘和细节,则应保持较高的取样率,但对每一样本只需分配较少的量化比特数。

② 空间-时间分辨率变换(即 P - f_t 转换) 电视画面每幅约需 $P=40$ 万个有效像素,仅是对观察静止物体而言,当物体运动时,人眼就分辨不出这么多像素了。显然,这时可以减少一



些像素数,但要保证足够的画面变换速度(即要有较高的帧频,也就是说运动分辨率要高一些,否则就会出现跳动和模糊的感觉)。静止图像不变换画面,每帧重复同一图像,运动分辨率可以最低。因此,细节分辨率 P 和帧频 f_z 之间也可以相互转换。

③ 灰度-时间分辨率变换(即 R - f_z 转换) 同样,在灰度等级 R 和帧频 f_z 之间,也存在这样一种双曲线函数关系。因此,对于快速运动的图像(通常所说的人眼需要的最高运动分辨率25 Hz,即指快速运动物体而言),眼睛对灰度级的分辨率降低,允许用较少的量化级数,但却要求较高的画面变换速度;反之,对于完全静止的画面,灰度等级要求最高。

上述这些性质主要是由人眼的视觉特性引起的。这些参数转换特性只适用于视觉用途,而在视频图像处理的其他应用中,并不完全适用。

(4) 数据量大。图像的数据量本来就很大,视频的数据量更大。这一直是视频图像处理和应用的主要问题之一。对于 640×480 的标准VGA(相当于与NTSC画面)真彩色24位图像,每帧的数据量为 $640 \times 480 \times 3 = 921\,600$ B,按30帧/秒计算,数据量为27.648 MB/s。一张650 MB的光盘,只能存储24 s的视频图像数据。

由于视频图像的上述特点,导致数字视频图像处理具有再现性好、灵活性强、处理精度高、数据量庞大(一幅 $1\,024 \times 1\,024$ 真彩色图像数据量可达3 MB)、占用频带宽(视频图像带宽约为56 MHz)、适用领域与涉及技术领域广、图像质量受主观因素影响等特点。

2. 视频图像处理的主要研究内容

(1) 图像滤波与重建。以提高图像质量,获得尽可能高分辨率的图像为主要目的,包括运动滤波、噪声滤波和超分辨率重建等。

(2) 运动分析。以模式识别为最终目的,研究视频图像中物体目标的分离、识别与跟踪。运动分析包括二维运动分析与三维运动分析,前者以二维平面图像的光流为依据,研究和估计图像内容的运动参数,后者以三维投影模型和二维运动估计方法研究图像中三维物体的三维运动和参数估计。物体的三维结构重建,既可以归于静态图像处理和图形学范畴,也经常在视频图像处理中讨论。

(3) 图像数据压缩。由于视频图像的数据量巨大,因此动态图像数据压缩是视频图像处理的主要研究内容之一:一类是以视觉为主要目的的动态图像数据压缩,这方面比较成熟,不仅制定了众多标准,而且已经得到广泛的应用;另一类是以运动分析等数据处理用途为目的的动态图像数据压缩,主要是为了保证数据的准确性和完整性。

视频图像处理可以看成静态图像处理的高层处理,又可以看成静态图像处理的继续。第一,它要用到静态图像处理的所有技术,因为视频图像是在时间上系列化的静态图像;第二,它包含了许多静态图像处理没有的或不能解决的新问题;第三,视频图像处理同时与图形学、人工智能、模式识别等多个学科领域都有交叉的内容,它们既有联系,又有各自的特征和侧重点。

有关视频图像滤波与重建,视频运动图像分析与视频图像数据的编码压缩等,详情可参阅本书参考文献[1, 2, 5, 10],这里就不再详细论述了。

7.3 视频内容检索技术

众所周知,安防视频监控系统不仅需要对前端实时监控,还需要对已存储的海量视频进行检索和回放。视频内容检索技术包括对监控视频运动目标检测、特征提取、相似度匹配等多项

技术,是通过计算机对视频的内容进行自动分析、提取特征信息制成索引等处理。当用户查询所需的内容时,系统自动返回与检索需求最相近的图像或者视频片段。例如,可以通过检索目标照片,方便地检索到该目标在监控区域内的所有活动的录像;或基于目标的重要特征(如颜色、大小、形状等)检索指定时间、活动范围内的录像资料,从而大大提高安防视频监控系统的检索效率和应用效能。

视频在现有的各种数据形式中,具有巨大的数据量、复杂的数据结构以及独有的时空特性。时空特性可以用来表征内容属性:空间上,视频可以区分为各个独立的物件;时间上,则表现为各自的运动特性。

视频数据包含低层次的视觉特性信息,以及高层次的语义内容属性,其中视觉特性信息包含有颜色、形状、纹理及运动等属性;而语义内容属性包含有人物、地点、事件及情节等方面。此外,低层次的视觉特性可以通过模型知识库的推理过程,自动生成高层次的语义内容信息,其关系如图 7-6 所示。

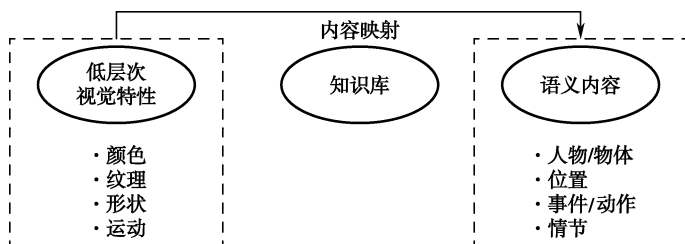


图 7-6 视频数据特性

安防视频监控产生的视觉资源是海量的,这些持续膨胀的视觉资源带来了相当严重的问题,大量的数字资源因无法对其进行及时有效的处理,而致使采集到的视频资源闲置。在大视频数据集合中,选择满足某些约束的视频子集是视频检索中的一个中心问题,也是安防视频监控系统必须具备的关键功能之一。本节介绍视频内容检索技术的基本概念、视频内容检索系统结构,以及视频内容检索的几个关键技术。

7.3.1 视频内容检索技术的基本概念

1. 视频内容检索的含义

所谓检索,是指存储与检索档案信息的过程。视频检索主要包含两层含义。

(1) 检查搜索,即从广泛的存储信息中查找相应信息。视频检索的这第一层意义,就是计算机接收用户输入的查询数据,并在视频数据库中查询相匹配的数据,它和文本、图像、音频等的检索基本在过程上是相同的,但是由于查询的数据和被查询的数据的差异,在相应检索技术上有很大差别。

(2) 索引,为大量的存储信息建立索引,以便于浏览。视频检索的这第二层意义,就是计算机自动或手动载入视频数据库,并且自动或半自动地为视频数据库建立索引,从而可以进行视频数据浏览的过程。



2. 常用的视频检索方法

常用的视频检索方法有基于文本标注信息的视频检索和基于内容的视频检索两种。

(1) 基于文本标注信息的视频检索。基于文本标注信息的视频检索是一种基于关键词的检索方法,其过程或步骤如下。

- 手工地对视频的底层物理特征以及多高层语义特征进行逐个的文本标注。
- 利用文本数据库有关技术来建立关键词数据库,采用文本数据库的检索方法检索得到感兴趣的视频关键词。
- 利用这些关键词来搜索实际的视频。

该搜索方式能够有效地检索结构化的文本信息,但是应用于视频检索会存在以下几个方面的问题。

① 视频数据自身包含有大量信息,用手工的方法来标注视频数据的关键词费时费力。

② 因视频数据具有相当复杂的低层视觉特征和高层语义特征,从不同的人对同一视频语义的认识存在有相当大的差别,这样就会导致关键词标注存在多义性。

(2) 基于内容的视频检索。基于内容的视频检索(Content Based Video Retrieval, CBVR)是指利用对视频数据从低层到高层的处理、分析和理解等手段获得视频内容,并根据视频数据中的场景、帧、镜头和运动对象和图像数据中的颜色、形状、纹理等特征在大规模数据库中找到满足特定的视觉特征描述的图像的过程。它需要利用图像处理、模式识别、计算机视觉、图像理解、信息检索、数据挖掘、认知科学、人工智能、人机交互等领域的相关研究成果。

3. 视频内容检索的几个基本词概念及特点

(1) 视频内容检索的几个基本词的概念。

① 帧。帧指代一副静态图像,是构成视频的最小视觉单位。

② 视频。视频是指由一系列静态图像帧组合而成的(其中包含目标运动、摄像机运动等信息),用来表达在时间及空间上由情节及事件构成的故事或者传达特定的视觉内容。

③ 镜头。镜头是指摄像机进行一次连续拍摄所获得的内容,是视频的基本单位。借助镜头边界监测可以找到代表视频基本单元的互相独立的镜头。

④ 场景。场景是指具有一定时序关系的相似镜头的集合,这些相似镜头具有视觉特征相似,以及时间相近的特点。

⑤ 关键帧。关键帧是指用来描述一个镜头或场景的关键图像帧,用于反映一个镜头或场景的主要内容,依据镜头及场景的复杂度能够提取至少一个关键帧。

⑥ 视频摘要。视频摘要是指利用静止或运动图像序列,来对一个视频文件的内容进行简单总结。

(2) 视频内容检索的特点。

① 突破了基于表达式检索的限制,可以直接分析视频信息,抽取特征,并利用这些特征建立索引。

② 提取特征的方法多种多样,包括颜色、位置、形状轮廓、纹理、空间关系等。

③ 采用模糊匹配,返回相似的视频集合。

4. 视频内容检索的研究

视频内容检索的研究,主要集中在以下几个方面。

(1) 视频数据模型建立。视频数据因其信息内容的多样性、丰富性、结构的复杂性,在视频模型建立过程中必须要考虑到一些特殊问题。当前,在视频数据模型有基于分段的模型、面向对象的模型、基于层次注释的模型、代数视频数据模型等。

(2) 视频结构化。视频结构化的目标是把视频分为镜头、场景,以及序列等不同层次的逻辑单元,用以进行不同结构层次的细粒度的视频检索。镜头切换主要有突变及渐变两种方式。

① 突变是指两个镜头间没有过渡,由一个镜头直接转换到下一个镜头的方法。在突变镜头切换中,因相邻两帧之间差别明显,所以检测的成功率也很高,成熟的方法包括颜色柱状图法和DC系数法和运动矢量法等。

② 渐变是指两镜头之间没有明显的镜头跳跃,存在逐渐过渡的过程。渐变又可细分为淡入、淡出、溶解和扫换等。淡入是指画面渐渐增强的方式,淡出是指画面渐渐消失的方式,溶解是指一个画面在逐渐消失的同时另一画面逐渐显现的方式,而扫换是指图像从画面的某部分开始逐渐取代另一部分画面的方式。当渐变镜头切换的时候,相邻两帧之间的差别不大,并且帧之间具有一定的相关性,对渐变检测提出了很大的挑战,目前已经提出的渐变镜头边界检测方法有双阈值比较的方法、基于聚类的方法、基于数学模型的方法、基于宏块类型的方法和基于小波变换的方法等。

镜头还只是一个物理单元,仍不足以描述有语义意义的时间或活动,或者讲在镜头层次上,还没有能力把视频节目的逻辑关系描述出来。为了从更大的视角来组织和表达视频,往往需要在镜头检测的基础上,建造更高层次的镜头集合聚类场景。聚类是指结合从属于同一场景的镜头,以形成视频层次结构,这不仅要考虑到内容相似性,而且还要考虑到时间连续性。此外,对镜头的结合还需要考虑人观看视频的感知特点,如同时或并行发生的时间必须串行地表现出来。

将内容相近但由编辑效果而分割的镜头组合到一起组成场景称为场景构造,它是视频内容中更高层次的聚类。一般情况下,场景的生成是指合成具有一定时序关系的相似镜头,需要对视频更多的语义理解,是对视频的高层次的抽象,用来描述具有语义意义的时间或活动。可以想象,让计算机来自动完成这样抽象具有相当的难度。

(3) 关键帧提取。关键帧是指用来描述一个镜头的关键图像帧,用于反映整个镜头的主要内容。利用基于关键帧的索引技术,在大大减少数据量的情况下,可以实现对整个视频内容的快速浏览和检索,因而关键帧提取的好坏与否具有决定性的作用,这得到研究人员长期的广泛关注。关键帧的提取方法主要有基于镜头边界提取关键帧、基于运动分析提取关键帧、基于图像信息提取关键帧、基于视频无监督聚类提取关键帧、基于镜头活动性提取关键帧和基于MPEG压缩流的宏块统计特性提取关键帧等。

(4) 视频数据索引及检索。索引项的确定决定了视频数据索引的建立,而索引项及其属性的选取跟视频数据模型存在密切的关系。目前,视频索引可划分为三类:基于注释的索引、基于特征的索引和基于特定领域的索引。

① 基于注释的索引亦称为高级索引,其针对视频模型中的定性特征而建立索引,一般利用计算机辅助手工以进行索引。当前基于注释的索引技术的研究多集中于选择注释语言、设计注释结构和设计便携的人机交互式注释界面等三个方面。



② 基于特征的索引属于低级索引,多采用视频模型中的机器自动识别内容的方式建立索引,用来减少人工索引的工作量,主要技术涉及对视频进行分段、识别关键帧、提取关键帧特征,之后依据这些关键帧特征来建立索引。视频数据的关键特征可是颜色、运动对象、纹理等。在当前技术水平下,视频特征提取的主要任务是在图像序列中检测出运动信息,识别与跟踪运动目标,以及估计三维运动和结构参数。

③ 基于特定领域的索引是指特别针对某特定应用领域的固有模式而建立起的索引,这种索引方法通常均是基于逻辑视频结构模型的,典型的包括新闻主持人镜头模型等。当逻辑视频数据单元被识别后,辅以语义信息来建立基于特定领域的索引,其主要约束是这些技术应用范围比较狭窄,不具备普遍性。

传统的一维索引技术(如 B-树等)并不适于用来索引多媒体数据,多媒体对象需要把颜色、形状和纹理等索引建立在一个多维空间中。当前,有很多高维索引的方法,也均有各自的优点。

KD-树是一种特殊的二叉树,节点的值是用一个多维向量而不是一个单一的数值来表示的,每个特征向量代表了数据库中的一个对象。对于每个节点,这个 K 个特征向量表示数据库中的一个对象,然后根据其中一个特征向量的值进行判断来决定怎样访问其子树,在其左子树的节点都具有比判断值小的特征值,而在其右子树的节点都具有比判断值大的特征值。

R-树及其变种作为一种多维索引结构得到了最广泛的使用。R-树是一种动态数据结构,比之 KD-树更为适合索引高维的特征空间。它将特征空间划分为多维矩阵,并且这些矩阵可局部相互重叠甚至重合。R-树的问题在于每个叶节点都只能指向一个区域,而该区域可能被许多其他的矩阵所覆盖,这样就会导致如果仅仅跟踪结构的一条通路进行搜索时遇到失败的情况。为改善 R-树的性能,人们提出了 R+-树和 R--树。树不允许矩阵发生重叠,会尽可能最小化重叠,两者的效果通常都要优于 R-树,SS-树也是经过改进 R-树而得到的,对于每个节点,SS-树运用最小边界矩阵,从而降低存储空间,提高最近邻检索的性能。但在高维数据集合中,SS-树会导致覆盖情况的增加,从而降低最近邻检索性能。要提高检索性能,树的更新复杂度会变得更

(5) 视频摘要。视频摘要是指在原始视频中提炼出视频片段,并且保留相对完整的含义,与文章的摘要类似,让用户能够迅速了解视频内容。可根据需要获得不同抽象层次及形式的视频摘要,如通过提取关键帧可以获得由静止图像构成的视频摘要;而形成由运动图像序列构成的视频摘要,当前的技术有利用先验知识来选取专题缩略,以及精彩画面剪辑的方法,利用压缩原始视频的方法来加速视频回放的速度等。

7.3.2 视频内容检索系统的结构

视频数据流是复杂无结构的,包含有文本、音频、图像及运动等多种媒体的表现形式,当分析和检索视频数据流时,需要综合运用多种多媒体分析技术。首先要分析视频结构,通过检测视频镜头边界把连续的视频帧分割为长短不等的镜头单元,并选择可以典型地表征镜头内容的关键帧,为实现一个高效的基于内容的视频检索系统的奠定基础;然后提取镜头中的运动特征以及关键帧的视觉特征,并将其存入视频数据库;最后,根据用户提交的查询需求,依照一定的特征将其与视频库里的特征进行相似性匹配,并把检索结果按照相似性程度提交给用户。



典型的基于内容的视频检索系统一般包含两个子系统：数据库系统和查询系统，如图 7-7 所示。

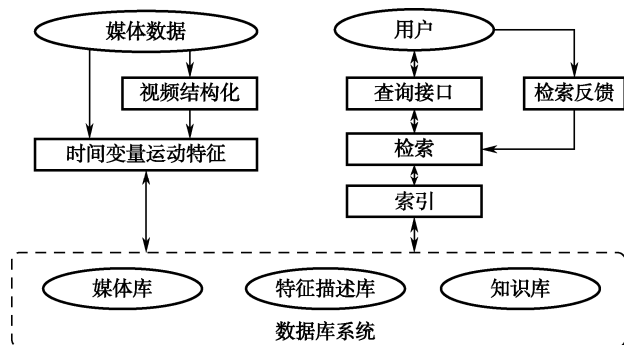


图 7-7 视频内容检索系统框图

1. 系统中各模块的主要关键技术

各模块所涉及的主要关键技术如下所述。

（1）视频结构化。对视频流进行镜头分割、关键帧提取、场景构建等结构化处理，把视频分层来表示，即划分为关键帧、镜头、场景以及视频序列等不同层次的逻辑单元，如图 7-8 所示。

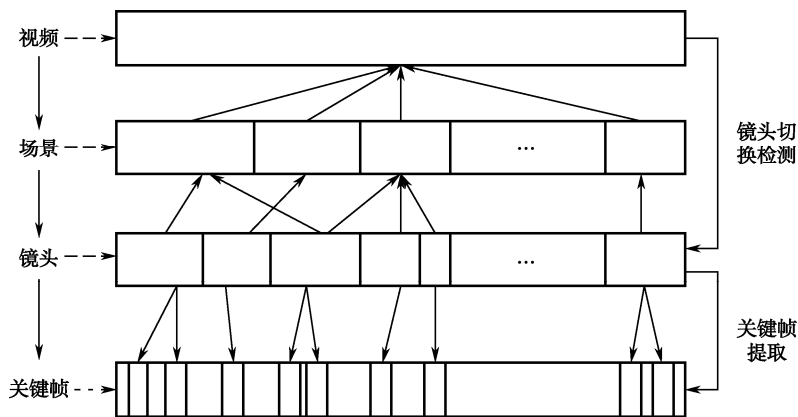


图 7-8 视频结构化表示

由图左从上到下可见，视频、场景、镜头、关键帧的分层结构化表示。

① 视频：是视频流的最高层次，在这一层可以加入一些针对视频文件属性和内容的全局解释。

② 场景：它描述了一个独立的故事单元，由语义相关的镜头组成，而这些镜头在时间上不一定是连续的。

③ 镜头：是指由摄像机记录下来的一段连续的帧序列，代表一组连续的动作。

④ 关键帧：视频的最小组成单元，每一帧的视频都是一幅静态图像，视频流就是由一系列连续的帧图像组成的，帧图像层具有时间序列性。关键帧是指能够描述镜头主要内容的帧。

（2）特征提取。不仅包含对原始视频流特征的提取，还包括对以帧、镜头、场景为单元的低级特征，以及高层语义特征的提取。



(3) 数据库系统构建。由媒体库、特征描述库以及知识库构成,其中,媒体库用于存储视频数据,如视频和图像等;特征描述库既包含手工输入的特征,又包含预处理过程中自动提取的内容特征;知识库里存放的是不同领域知识的表达。

(4) 查询接口。该模块主要作用就是设计良好的人机交互界面,接收用户的查询要求,并将此要求递交给系统;把查询结果返回到用户那里;将用户的反馈信息提交系统,利用机器学习的方法来优化查询矢量、调整相似度模型以及相关门限值,进一步查询以提高检索的相似度,最大限度地满足用户需求。

(5) 检索。检索是指利用特征间的距离函数,进行相似性的匹配。检索结果是根据用户的查询要求,以及相似性判断标准,近似得到数据库的候选集合。相似性度量方法直接关系到检索结果是否满意。

(6) 索引。对于视频数据库,通过人工标注关键词来对视频中图像的运动、帧图像的纹理、形状来进行索引,主观性太大,并且耗时,因此,要达到基于内容的视频检索的目的,必须要突破基于关键词的索引技术的限制,需要深入对视频内容进行分析,抽取语义和内容特征,建立语义索引。

(7) 检索反馈。视频检索系统将检索结果提交给用户,然而由于视频结构的复杂性和内容的丰富性,依据用户给出的示例或者特征,可能并没有从视频数据库中检索出用户所需要的视频,这就需要系统具备人机交互的能力,通过反复地迭代检索,来满足用户的需求。

2. 提交查询说明的形式

基于内容的检索系统,一般向用户提供直观的图形查询界面。主要用以下两种形式提交查询说明,这两种形式也可以结合使用。

(1) 样例查询说明。通过样例来表达查询要求。用户可以从示例模板库中选择样例,也可以浏览选择某个样例,系统将从该样例中实时提取特征矢量,用于基于案例的检查。

(2) Schema 说明。普通用户可能往往难以提供较为复杂的查询要求。因而,在这种情况下,系统向用户提供统一的 Schema 样式,以用来形成复杂检索条件。

3. 视频内容检索流程

基于内容的视频检索流程一般包括四个主要步骤:特征提取、数据流分割、数据分类和数据索引结构的构造和检索,如图 7-9 所示。

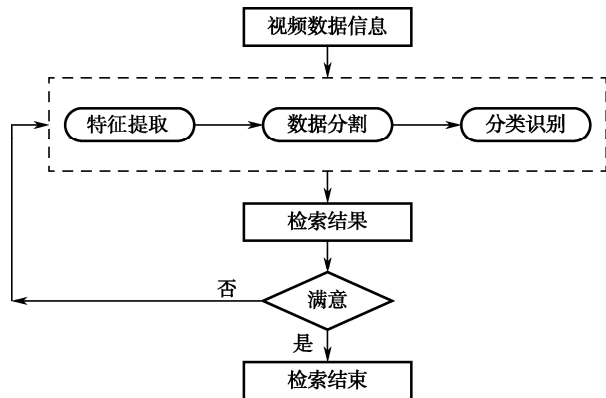


图 7-9 基于内容的视频检索流程

在图中,特征提取是用来寻找分类特征的表达式,提炼出能够用来分辨待检索信息,以及其他视频数据信息的不同特征矢量。视频数据中的特征,可以是在图像及视频中抽取的视觉特征,亦可以是从音频中抽取的听觉等特征。根据多媒体底层物理特性进行视频数据分割,当连续的视频数据切分成不同的物理单元后,接着需要进一步对识别分类这些物理单元,最后通过聚类再归属成事先定义好的特定语义类。

基于内容的查询和检索属于逐步求精的循环过程,具体分为:

- 在初始阶段,可以用查询语言来形成简单查询,系统把查询描述映射为具体的视频特征矢量。
- 将查询特征与特征库中的特征,按照某种匹配算法进行相似度匹配。
- 满足一定相似性条件的一组候选结果,依照相似度大小排序后返回给用户。
- 系统返回的查询结果用户可提出反馈,通过交互选择,直至得到满意的结果;或者根据返回结果,凝练查询描述,形成一个新的查询。
- 逐渐缩小查询范围,并重复迭代,直到用户对查询结果满意。

7.3.3 视频内容检索的关键技术

1. 视频分割

对视频分割存在两种不同的理解:一种解释为,视频分割是把连续视频流分割成相对独立、具备特定语义的视频片段的过程,这种解释更接近其字面上的意思;另一种理解是,视频分割是指对图像或者视频,按照一定的标准分割成区域,旨在从视频序列中分离出具有一定意义的视频对象。对视频分割的第一种解释更近似于镜头边界检测的概念,后一种解释类似于视频对象提取的概念。

虽然,视频是由一系列帧组成,但是,作为一幅静态的图像,绝大部分帧(非关键帧)对视频检索的作用不大。在新一代视频编码标准中,音/视频信号是基于对象表示的,视频对象定义为在视频场景中用户能够存取(搜索、浏览)及操作(剪切、粘贴)的实体。例如,一个人、一条狗、一架飞机、一栋建筑物都是一个视频对象,它们都具有语义上的意义。在正在拟定的MPEG-7标准中,提出了基于对象的检索、浏览技术。这样,以视频对象提取为目的的视频分割,就在基于内容的视频检索过程中发挥非常重要的作用。

具体到安防视频监控系统获得的视频,它们具有两方面特点。

一是没有严格意义上的“镜头切换”。监控视频不同于电视节目、新闻、电影等视频,后者一般都有明显的镜头切换痕迹,如新闻视频,演播室内的主要镜头和新闻现场镜头往往在背景内容、画面变化频度等方面具有明显的差异,这为镜头边界检测提供了很大便利。监控视频一般由位置和角度固定的摄像机持续长时间采集获得,一般认为自始至终“就一个镜头”,不存在“镜头切换”的说法。即便如此,安防监控视频依然具有分割的需求,因为绝大部分时间监控画面内都是静态背景,或者正常的动态画面,这些片段对监控意义不大,重要的是需要通过视频分割在长时间连续的视频中,获取人员入侵、交通事故等特定事情发生的视频片段。

另外一个特点是,当前安防监控摄像机大部分采用H.264、MPEG-2等编码标准,而MPEG-4等基于对象的编码标准很少。根据应用背景的不同,安防监控视频的分割采用不同的标准。例如,入侵监控的视频,将某一人和物体在图像中的出现和消失作为片段的头和尾



(图 7-10 所示即为基于目标跟踪确定视频片段的头和尾);又如, 交通监管视频将某一车道/道路上出现非正常停车作为事故片段的头, 车流恢复顺畅作为片段的结束。



图 7-10 基于目标跟踪确定视频片段的头和尾

因此, 安防监控视频的分割主要依赖视频目标物体(包括人)的检测、识别跟踪技术。具体来说, 包括视频目标的特征表示、视频目标的检测与识别, 以及视频目标的轨迹跟踪。

(1) 视频目标的特征表示。被跟踪的目标物体多种多样, 一般可通过其自身的形状和外观来进行表示和标记, 常见的形状描述方法包括质点、几何形状、目标轮廓、模板、多视角模型等; 另外, 还要选取合适的特征变量, 对目标物体进行区分和标记。目标特征是目标物体具有的一个或多个具有量化性质的度量函数, 目标特征的选择与目标的表示方法有紧密关系, 常见的目标特征包括颜色、边缘、纹理、光流场特征(用于描述像素运动分布情况)等。为了弥补单一特征自身的缺陷和局限, 常将多种特征组合使用。

(2) 视频目标的检测与识别。视频目标跟踪的前提是要在视频图像上锁定目标所在的区域, 也就是目标检测, 然后由跟踪算法确定当前帧和下一帧目标位置的一致性关系。常用的目标检测方法有如下几种。

① 基于局部特征的方法。该方法利用目标物体的某些局部特征来识别目标, 其优点在于, 当非关键性的部分特征被遮挡时, 利用其余的可见特征仍然能完成目标检测。目前常用的局部特征包括显著特征点、边缘特征及显著区域等, 其中特征点包括 Harris 角点、KLT (Kanade-Lucas-Tomasi) 特征点、SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) 特征点、SURF (Speeded Up Robust Feature) 特征点等。利用特征点的局部特征描述方法判别性强、定位性准, 在图像发生几何形变、光照变化、尺度变换甚至模糊等情况下, 具有良好的稳定性。而利用边缘特征的检测方法, 虽然在抗干扰能力方面有显著特点, 但它是牺牲算法的复杂度为代价的。而显著特征区域, 则包括 HOG (Histogram of Oriented Gradient)、MSER (Maximally Stable External Regions) 及基于灰度的区域。同样, 为了弥补单一特征的不足, 常将不同局部特征融合使用, 发挥各自优势, 提高准确度。

② 基于运动信息的方法。该方法是目标检测识别最基本的手段, 前提是假设视频前景运动物体与背景的运动特征不同, 背景运动缓慢, 前景目标运动相对较快, 通过运动分析, 可以有效分离目标区域。

差分方法是最常用的基于运动信息的目标检测方法。首先对相邻帧的视频图像运用减法运算, 然后利用检测帧序列之间的相关性, 并最终确定运动目标。对于摄像机位置固定, 背景静止的安防监控视频, 差分方法尤其适用, 只需通过相邻帧的差分检测画面中的差异部分, 即可提取目标的运动区域。差分方法直观易用, 对光照变化不敏感, 但是在目标移动过缓或者过快时, 检测结果准确度不高。

基于背景建模的方法, 将当前视频图像与实现完成建模的背景图像相减, 若某区域结果大于给定阈值, 则认定它是运动区域。这种方法需要背景模型随环境变化不断更新, 并且计算量比较大。

此外,光流法是通过计算机图像的光流场并对其图像经行分割来检测运动目标,该方法计算更加复杂,一般需要专门的硬件加速设备才能做到实时处理。

这3种方法在7.4节将专门介绍。

③ 基于图像分割的方法。该类分割方法将图像划分为多个子区域,子区域中的像素点具有近似的属性,如颜色、纹理等,子区域还包含一些简单的语义信息。

基于子区域的计算,相比基于像素点的计算,效率更高,它为确定目标所在区域起辅助作用。

④ 基于模板匹配的方法。其基本思想是将实际视频图像的各个子图像与某个预置的目标模板匹配,度量其相关性,相关度量值最大的位置,即为与目标模板最匹配的图像区域,也就是目标物体所在的区域。

匹配计算可用的方法有最大互相关函数、最小均方差函数、最大匹配像素统计、欧氏距离等。一般来说,目标会随着时间和角度的变化而发生外观变化,因此目标模板也需要随之更新。

⑤ 基于统计学习的方法。这类方法主要借鉴人工智能领域中的机器学习理论,将目标检测识别问题转化为分类问题。在目标样本集合上自动学习,进而训练目标分类器,最后利用分类器在视频图像中找到目标位置,在动态目标检测方面的应用效果非常良好,也因此受到了广泛的重视,其中常用的机器学习算法包括神经网络、Adboost、支持向量机 SVM、强化学习等。

(3) 视频目标的轨迹跟踪。目标跟踪是为了获取目标在视频图像中的移动路线,以便确定视频分割的边界。在不同的应用环境下,对目标跟踪算法的性能要求各不相同,如公共场所的监控系统通常要长时间持续工作,所以更注重算法稳定性,能抵抗噪声、光纤等因素的不良影响;防入侵监控系统对目标检测和跟踪算法的准确性要求更高;而对交通监控而言,跟踪算法需要处理的目标更多,目标移动速度快,算法运行的实时性至关重要。

通过目标跟踪来确定目标在视频序列图像中的位置轨迹,主流的方法是自顶向下的方法,又称为模型驱动的方法。首先利用先验知识对跟踪问题建模,同时产生一组关于目标状态的假设,然后利用实际的帧序来验证目标状态的正确性,实现对目标位置和状态的估计。这种方法主要是依据贝叶斯理论,在已知目标先验概率及当前状态的情况下,把目标跟踪转化成推断求解目标最大后验概率的问题。到目前为止,出现很多求解贝叶斯后验概率的方法,其中粒子滤波(又称为凝聚算法, Condensation)适用于任何能用状态空间来表示的非线性系统,对状态参数的非线性特性有更强的建模能力,可以更精确地表示动态目标状态的后验概率。

2. 关键帧提取

在构建基于内容的视频检索过程中,关键帧的提取是极其重要的步骤。关键帧试图反映其在视频片段的主要事件,以这种复合人类视觉感知并有意义的方式来表达视频内容。关键帧提取是一个简单而有效的视频内容抽象方法,为接下来的视频聚类样本数量考虑,关键帧提取一般采用“宁错勿缺”的原则。以下就是几种常用的关键帧提取方法。

(1) 基于镜头的方法。该方法建立在基于镜头边界的视频分割基础上,起初仅选择镜头的第一帧作为关键帧,到后来首尾帧均作为关键帧。毋庸置疑,这种方法获取的关键帧很难代表整段视频。之后提出帧平均法和直方图法,前者从视频镜头中选取所有帧在某像素点的像素平均值,然后把镜头中在该点上像素值与平均值最接近的帧当成关键帧;直方图法则是对全部帧的统计直方图求平均,然后选择跟该平均值最接近的帧当成关键帧,其中最常用的直方图是颜色特征直方图。安防监控视频虽然不存在镜头切换,但是在根据目标检测识别实现了视频分割



之后,也可在视频片段中利用上述两类方法提取关键帧。

(2) 基于内容的方法。为了尽可能全面地反映视频片段(镜头)的内容,提取多个关键帧是很有必要的。根据信息论的观点,两个相关性很小的帧图像比类似的、相关性较大的帧图像能提供更多的信息,所以在由连续 N 帧图像组成的视频中,关键帧的提取更倾向于考虑不相似的两帧。为避免计算任意两帧的相关性,降低计算复杂度,研究人员提出如下的简化方法。

令 f 表示一帧图像,设 $S=\{f_1, f_2, \dots, f_N\}$ 表示含有 N 帧图像的视频片段,如 f_1 、 $f_{N/2}$ 、 f_N 作为候选关键帧,帧间距离定义为 $D=(f_i, f_j)=\sum_{x,y} |f_i(x,y)-f_j(x,y)|$ 。在提取关键帧时,先计算两两候选帧之间的距离 $D(f_1, f_{N/2})$ 、 $D(f_{N/2}, f_N)$ 和 $D(f_1, f_N)$,并将它们与预先设定的阈值 T 比较,选取关键帧的规则如下。

- 如果它们都比 T 小,说明它们相似度高,选取 $f_{N/2}$ 为关键帧。
- 如果它们都比 T 大,说明它们不相似,差距较大,将这三帧都选为关键帧。
- 在其他情况下,取距离最大的两帧图像作为关键帧。

上述方法能根据视频内容的变化程度在首、尾及中间帧中选取1~3帧作为关键帧,既具有一定的代表意义,同时又可降低算法的计算复杂度。

(3) 基于运动分析的方法。在常用的目标检测方法介绍的基于运动信息的方法中,提到的差分方法与背景建模方法都没有考虑运动特征。而现有研究人员提出的基于光流分析的算法,是利用光流分析计算视频中的运动量,当运动量达到局部最小时,选取关键帧,所以这种基于运动分析的方法能够依据视频结构,选择相应数目的关键帧。

此外,在由多镜头构成的视频序列中,多个重复交替出现的镜头(如对话、打斗)可以聚类成在一个事件情节,此时可以对这些镜头分别提取关键帧,组成表示该情节的关键帧,因此有了基于聚类的提取方法。为能够直接依据压缩视频中的某些特征来提取关键帧,需要首先检测视频镜头的切换,研究前后镜头间帧的运动补偿关系,然后确定关键帧,这就是基于压缩和切换的提取方法。安防监控视频很少出现镜头补偿,因此这两种方法在安防监控视频提取关键帧的方案中很少使用。

3. 视频特征提取与索引

对中低层视频特征数据建模,采用的技术是传统的图像处理与视频处理技术,提取这些特征,实现诸如“某日白天的视频”、“有物体经过的视频”,以及“从画面左边运动到右边的视频”等的查询。对于高层语义数据建模,采用的是计算机视觉、认知科学、统计与逻辑推理、人工智能等技术,提取视频对象及相关关系,甚至产生对场景事件的摘要,实现诸如“有人经过的视频”、“有人越过安全线的视频”,以及“有交通事故发生的视频”等的检索。

视频内容分析过程中的特征提取与视频结构分析,所依据的特征不甚相同,用于描述不同层次视频单元内容,既包括视觉特征同时又包括语义特征。内容特征,特别是语义特征的提取,是一个相当复杂的问题,当前大多停留在研究领域,即使现在正在使用的一些技术(如人脸识别),都对视频的背景提出了较高的要求。

视频索引是利用视频数据来实例化视频数据模型的过程,它与传统的数据库索引具有相当大的差异,它不仅仅是一种索引结构,更重要的是,它还要提供一种抽象数据类型,用来对视频数据的视觉和语义特征进行封装,才能给对基于内容的视频检索提供支持。

从索引的产生方式来看,索引可划分为人工索引、半自动索引及自动索引。自动索引实现起来相对困难,人工索引受人为主观因素的影响太大,半自动索引首先运用计算机对那些能够

自动识别的内容进行自动索引,其余内容交给由人工索引来完成。

从索引内容来看,视频检索分为如下两类。

(1) 基于注释的索引,通常是高级索引,涉及视频的语义内容,亦称为关键词索引;基于特征的索引,通常是低级索引,主要涉及视频的视觉内容,其目标是建立全自动索引。当前,学术界研究最多的,依旧是基于特征的索引。

(2) 视频特征索引的一个重要特征是多维数据索引,用于建立索引的特征往往在几十维甚至达到上百维,如此高的维度必然会使检索的性能遭到破坏。解决多维索引有两种途径:一是降维,二是利用空间访问的方法(Spatial Access Methods, SAM),降维又可由特征选择与提取两种方式实现。而SAM方法主要是使用各种索引结构,如R-树,来避免产生时间复杂度因数据库的规模而线性增加的问题。

4. 内容相似性检索

基于内容的视频检索的一个相当重要的特点是:它是一种相似性检索,这与基于关键词的检索方法是不甚相同的。基于关键词的检索方法采取的是精确匹配,而基于内容的视频检索则采取的是相似性匹配,其评价标准是用户提供的查询关键词(或样例帧)跟数据库中视频的特征向量之间的相似度,因此在基于内容的视频检索中,相似性度量是一个非常关键的问题。

(1) 用户查询的描述方式。为进行视频检索,用户提交的检索要求通常支持三种描述方式。

① 自然语言或格式化的自然语言描述,即通过关键词查询,这需要匹配关键词和视频的标注信息,这些标注信息属于特征提取信息。

② 通过样例帧或视频图像的方式来检索,这样可降低语言描述的认为主观因素的影响,例如借助截取到的某人的视频图像,就可以在监控视频中搜索到它出现在监控镜头中的时间,通过获得的相似帧可浏览它所代表的视频片段。

③ 通过样例视频来描述检索对象的动态特征,例如,人的面容特征可通过化妆、衣帽遮挡等躲避监控系统,不过人的行走姿势倒是不会轻易改变的,因而可依据含有目标的视频片段检索到对象出现的时间和地点。

当然,这样的应用对视频目标动态特征的数据建模以及相似度匹配算法都提出了极高的要求,并且其应用领域也比较单一。

(2) 相似性检索方法。基于内容的视频检索采用的方法是近邻搜索和范围搜索。近邻搜索指的是把与用户查询最相近的一组检索单元递交给用户;范围搜索则是把与用户查询的相似度小于某一门限的全部检索单元或者与用户查询最相似的 k 个检索结果提交给用户,因而也称为 k -NN-Search。

桶算法(Bucketing Algorithm)是最早的近邻搜索算法,它有规则地划分数据集空间,并把每个划分里的数据点储存到一个桶中。那么怎么在所有的桶中定位到跟给定点最近的桶,成为桶算法待解决的主要问题。实验结果表明,桶算法对数据空间进行的规则划分,特别是对于均匀分布的数据集来讲,是相当有效的。

另外一种较为实用的检索方法是基于 k -d树的多维超立体(Multi-Dimensional Rectangulation with k -d-tree)的方法,它的做法是按照一定规则选取某一坐标轴方向当成切分方向,借助空间划分的方法把数据集切分成两个子数据集,然后对这两个子数据集进行递归切分,形成一棵检索树。该结构不仅具有检索速度快的特点,而且其空间复杂度跟数据集的维数成线性关系,是当前解决 k -NN-Search问题最行之有效的方



按照不同的匹配范围,相似性量度又可划分为局部匹配及全局匹配两种,这两种方法各有优缺点。局部相似性量度方法借助了视频片段间的时序关系,但仅限制在简单的线性关系上;而全局相似性量度方法具有检索信息少、检索速度快等优点,但却缺乏描述视频的时序关系。针对以上方法的缺陷,有关研究人员研究了基于运动物体轨迹的方法,以及基于流形假设的最短特征线方法等。

到目前为止,绝大多数的视频检索系统,都建立在度量低级视频特征变量的相似性的基础之上,高层的语义特征相似性度量依旧是检索系统的重点和难点。因为视频结构复杂,语义信息丰富且歧义较多,例如,“人骑着自行车经过”,以及“人推着自行车经过”,这样的查询请求看似简单,但对计算机系统来讲,却要借助庞大的人类知识库,数据、行为建模的过程也是非常复杂的。

(3) 快速检索的方法。基于内容的视频检索,需要在高维的数据空间中寻找类似的视频片段,而这个过程需要相当大的计算量。因而,怎样提高检索的效率,是所有视频检索系统都要解决的难题。在某些应用环境下,倘若检索结果中仅仅存在一个或几个满意的视频片段,就能够极大提升用户的满意度。因此,许多时候会牺牲搜索的精确度,来换取更高的检索速度,从而产生了近似最近邻搜索技术。

提升检索速度的另外一个杀手锏是分层索引。例如,把视频片段分成“片段-帧”两层或者“片段-镜头-帧”三层,高层媒体对象(如片段)的相似性需要依据低层的相似性来衡量,在进行低层相似性比较之前,首先通过高层过滤掉一部分待选视频。例如,对于二次型距离的直方图匹配检索而言,可采用计算量较小的距离度量,先对信息库进行一番检索,得到一组候选的媒体对象集后,再对此候选媒体对象集,运用原距离度量,这样可极大降低计算量。

5. 视频语义分析与检索

在视频内容检索中,语义是一个十分重要的概念,但目前语义的定义还不甚完善。因同一张图像或同一片段视频可能会面对多种不同的重用需求,可能要依据许多不同的、无法预料的甚至可能是矛盾的需求,来对同一种内容进行解释,这就需要媒体数据内容要利用某种更有条理语义领域模型,而不是关键词来进行描述。语义数据涵盖媒体所要表达的内容以及对象,把它们连接成为领域概念集,将媒体数据本身与“概念世界”架起桥梁。

对语义的理解是人们能够从图像或视频中获得的信息,它包括视频中存在的重要的物体、它们之间的时空关系,以及视频背后所隐含的内容。例如,物体Ⅰ和物体Ⅱ的上面,而物体Ⅲ在物体Ⅳ的下面,在它们的位置发生改变时,我们所得到的信息也发生改变的;又如在足球比赛中,当足球在两个门柱之间时,我们得到的信息是进球了,而检测发现足球在两个门柱外,则没有进球;另外时间信息对于视频理解也是十分重要的,如事件Ⅹ发生在事件Ⅴ之前还是之后,人们所得到的信息也是不同的。

多媒体数据语义模型应具有三个基本属性。

(1) 模型的提炼性。语义模型要高于多媒体数据自身,可充分表达多媒体数据的语义内容结构,并指导相关的各种语义处理过程。

(2) 模型的继承性。语义模型本身是一种在演变和进化过程中的继承模型,这是模型发展的前提条件;另外,语义模型中的语义概念和关系存在着继承关系,在相关的语义对象间需继承上层对象对应的属性等内容。

(3) 模型的自适应性和可扩充性。语义模型必须要能够适应不同领域的语义应用需求,

迫切需要更为灵活、高适应性的多媒体数据语义模型。

有别于结构建模,语义模型着重开发高层概念化的模型,用于表示和管理视频中包含的对象、事件和关系等语义信息来支撑语义查询的实现。有研究者已经调研了 VIMSYS、VideoGraph、AVIS、Extended ExIF02、Videx、BilVideo、THVDM 等系统,调研结果表明,语义模型可以划分为基于标注的模型,以及所谓的丰富语义模型。丰富语义模型来源于人工智能领域的语义网络、本体论和数理逻辑等方法,可以描述现实世界中的实体(如概念、事件、对象),以及它们之间的多种复杂关系。利用分层结构,在最底层表示原始的视频流,在最高层表示语义信息,中间可能涉及逻辑视频段层、特性层及媒体对象层等。

语义获取主要有三种方式:基于人工标注与反馈、基于知识映射及基于内部信息提取。语义获取模型,如图 7-11 所示。

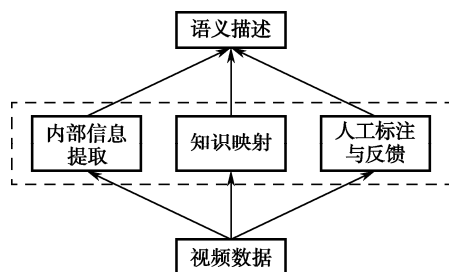


图 7-11 语义获取模型

基于人工标注和反馈提取语义包括两方面含义:一是人工添加文本与元数据,属于人工标注方法,具有表达信息直观、易于机器处理的特点,而缺点是将大规模实现起来存在困难,工作量巨大;二是通过 UI 反馈技术,利用交互学习的方法来修正多媒体数据的语义描述。

基于知识映射来提取语义,就是把计算视觉与图像理解的相关技术引入到多媒体索引和检索领域,根据领域知识建立基于模型的语义探测与识别方法。换言之,就是对照内容中所探测到的概念建立对应的模板,通过监督学习的方法,对底层特征进行训练,建立概念与特征间的映射关系。

基于内部信息提取语义主要是指使用自动语音识别技术或者文字识别技术,进行自动或半自动的标注工作,当前已成功在新闻视频和广播视频数据等领域得到有效应用,但对于格式、类型、结构复杂,内容多变,表现多样的多媒体数据来说,却无法适用。

在获得语义信息后,对于发现语义内容的结构、指导语义处理而言,语义的层次分析具有十分重要的意义。语义表示模型的研究需要将底层特征(如颜色、字频等)包含在语义范畴内,通过分析原始数据,利用导出的数据和内容来组建底层语义层,如颜色、音调、字频、词频等底层特征;在此基础上,借助知识、经验、模型等将导出或者发现的高层语义信息纳入到高层语义层,如对象语义、抽象语义以及空间语义。

对于任何利用语义以达到跨越语义搜索鸿沟的目的,当前主要采用的是相关反馈和自动标注的方法。前者借助系统和用户的交互获取多媒体数据高层语义与底层特征间的映射关系;后者则使用关键词标注多媒体数据,这一技术在图像领域得到了广泛应用。但目前对于彻底解决语义搜索鸿沟问题,基于语义的方法还不甚有效和完善。

7.4 安防中常用的视频运动目标的检测与识别方法

随着视频监控系统在现代社会中的广泛应用,大量前端视频采集设备的应用产生了海量的监控视频信息,传统的人工处理方式已经无法满足大规模视频监控应用的需求,许多视频信息无法得到及时、高效的处理,因而大规模视频监控应用亟待智能视频图像信息处理技术的支撑。在诸多智能视频图像信息处理技术中,目标的检测识别是最基本也是最重要的技术,首先对不同的运动物体进行正确地检测识别和分类,才能使后续的行为理解和异常行为报警等功能更加具有针对性。

目标的检测识别是指将某一个或多个特殊目标从其他目标中区分出来的过程,这其中既包括两个相似度较高的目标的检测识别,也包括一种类型的目标同其他类型目标的检测识别,该技术可应用到军事监视、海底探测、动物追踪、人脸识别等。

目标特征的形态具有多样性,如人体的非刚性,颜色的多样性等,加上遮挡、阴影等干扰,都会造成目标检测的高难度和较差稳定性。因此,稳健而高识别率的目标检测与识别,是极其重要的一个研究课题。

根据摄像机与目标背景之间是否存在相对运动,目标检测识别算法可以分为两类:静止背景的目标检测识别与运动背景的目标检测识别,其中,静止背景的目标检测识别是运动背景的目标检测识别的基础。由于背景与摄像机之间位置保持相对不变,那么背景图像的大小和位置在不同图像序列中将保持不变。而常用的运动背景的目标检测识别的方法主要有背景差法、帧间差法和光流法,下面将分节论述。

7.4.1 背景差法

1. 背景差法的基本原理

在计算机视觉领域中,图像可以用灰度来表示,灰度是指黑白图像中像素点的颜色深度,其取值范围一般为 $0\sim 255$ 。背景差法正是利用了安防视频监控系统中图像的运动目标的灰度值和背景的灰度值差别较大的特性,对存在运动目标的区域内图像选择一个适当的阈值 T ,当差值图像某点的灰度值小于 T 时,认为背景点;反之,则认为运动目标点。

背景差法的原理,如图 7-12 所示,由图可知,背景差法主要涉及背景提取、背景更新和阈值选取三个问题。在实际应用中,还要考虑运动目标的阴影和背景变化等因素的影响。

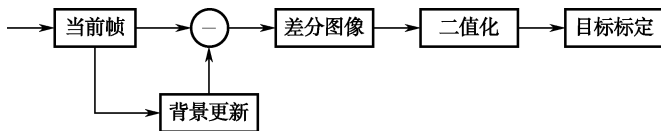


图 7-12 背景差法的原理

2. 背景差法的算法推导

在图像序列中,固定像素点的灰度值,通常在某一稳定值上下进行小幅振荡,当有某一位置有运动目标出现时,在该位置的像素会有较大幅度的变化。

利用视频图像序列灰度值变化的特征来提取背景图像,可采取的步骤如下。

(1) 读入图像的 N 帧图像序列, 对这些图像序列中每个对应的像素点取平均值, 得到平均图像即为背景, 完成初始化。

(2) 用当前帧和背景做差, 通过比较各像素差值与固定的阈值来判断哪些像素属于前景(即目标), 哪些像素属于背景。

其计算公式为

$$G_i(x, y) = \begin{cases} 1, & |f_i(x, y)| \geq T \\ 0, & |f_i(x, y)| < T \end{cases} \quad (7-14)$$

式中, f_i 为第 i 帧视频图像; B 为提取的背景图像; T 是灰度阈值; G_i 为二值化后的差值图像。阈值 T 的选择, 对最后的识别效果影响非常大, 其选取原则是既可以将背景噪声和运动目标引起的变化分开, 又能够消除噪声带来的影响。

由式(7-14)中可知, 背景差法需要一个合适的背景图像 B 来与当前图像做差。由于光线、温度、湿度等外部环境的影响, 其背景是在缓慢变化的, 但是在一段时间内可以认为是不变化的。背景图像的获取及更新对背景差法的最终效果会产生较大影响, 因而在背景差法中不仅需要准确获得背景图像, 还要在适当的时候对其进行更新, 否则会导致很多识别误差。例如, 一个进入监控区域的静止物体会被认为运动目标; 一个离开监控区域的物体会在以前停留的地方留下一个空洞, 进而会被认为一个新的目标。

3. 背景差法优缺点分析

背景差法的优点是, 原理简单、算法复杂度低、容易实现, 而且能够得到较为完整的运动目标信息, 因此在运动目标识别图像分析上应用很广泛, 是常用算法之一。

背景差法的缺点是, 该方法过于依赖背景图像, 而背景图像易受各种外部因素影响发生渐变或者突变, 需要进行及时的背景更新, 否则会影响最终目标识别的实时性。此外, 该算法需要人为设定阈值, 依赖具体应用而缺乏统一尺度。

7.4.2 帧间差法

1. 帧间差法基本原理

帧间差法又称为序列差分法或相邻帧差分法, 其原理与背景差法原理类似, 只是将背景差法中的背景图像换成前一帧图像。其基本的工作原理是, 在静止背景的目标识别中, 相邻两个图像帧之间的背景区域基本不变, 做差后基本可以相互抵消; 但当某一图像帧的某区域出现运动目标时, 则两帧在运动目标出现区域就会有较明显的差别。与前述的背景差法类似, 帧间差法通过做差求出两帧的差分图像之后, 再对差分图像按一定的规则进行二值化, 得到二值化图像, 最后通过对二值化图像进行分析并设置一个合适的灰度阈值 T , 就可以判断出目标的区域。其具体过程如图 7-13 所示。

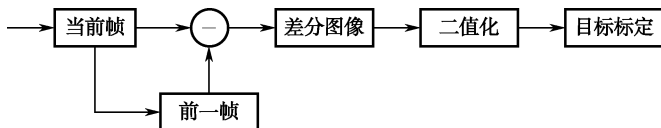


图 7-13 帧间差法的原理



帧间差法比背景差法应用范围要广，也不需要背景更新，而且很适用于存在多个运动目标和摄像机移动的情况。

2. 帧间差法算法推导

帧间差法可以选择与前 k 帧做差分，设差分图像为 D ，则

$$D_n(x, y) = |I_n(x, y) - I_{n-k}(x, y)| \quad (7-15)$$

式中， I_n 和 I_{n-k} 分别代表当前帧和前 k 帧图像，这里 k 是预先设定的差帧间隔。如果图像序列中目标运动缓慢，则可将间隔 k 设置较大；反之，则将间隔 k 设置较小；当 $k=1$ 时，退化成相邻帧差法。

对差分图像 D ，按下式进行二值化，即

$$B_n(x, y) = \begin{cases} 1, & D_n(x, y) \geq T \\ 0, & D_n(x, y) < T \end{cases} \quad (7-16)$$

当差值大于 T 时，认为是运动目标；反之，则认为是背景。

3. 帧间差法优缺点分析

由于差分的对象为相邻或间隔不远的两帧，帧间差法最大的优点是，对背景变化不敏感，当背景部分往往变化不大时，差分运算时，能相互抵消。同时，由于只依赖于邻近的几个图像帧，稳定性也较好，对环境变化适应性很强，在外部环境变化剧烈的情况下，仍然能够取得很好的效果。

然而帧间差法的缺点是，只能提取目标的边界，而不能对运动目标的完整区域进行提取，且帧间间隔的 k 选取，也对目标识别的结果影响较大。

7.4.3 光流法

1. 光流法基本原理

光流法是一种利用图像的连续变化识别出目标的方法。人眼之所以能够看到物体运动，是因为经物体反射的光线，可以在人眼的视网膜上形成不断变化的、连续的图像，就像水一样流过人眼的视网膜，因而直观上可以将这理解为一种由光线形成的流，故称为光流。这种光流包含了运动目标的信息，反映了图像的变化过程，因此可以从光流中来寻找运动目标。

由于图像中每个像素点的灰度值，都可能不停地发生变化，如果将这个变化的速率定义成光流矢量，整帧图像的光流矢量就形成了一个光流场。当图像中不存在运动目标时，光流场在整帧图像中变化是连续的；当图像中出现运动目标时，运动目标和图像背景之间，就会存在相对运动。这样，运动目标所形成的光流场和图像背景形成的光流场就存在差别，据此就可以得到运动目标的区域和位置信息。

光流法基本原理如图 7-14 所示。

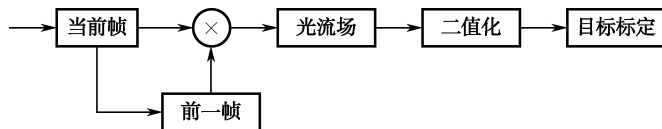


图 7-14 光流法的基本原理

2. 光流法算法推导

设函数 $G(x,y,t)$ 是像素点 (x,y) 在时刻 t 的灰度值, 设 $t+dt$ 时刻该像素点运动到 $(x+dx, y+dy)$, 它的灰度值为 $G(x+dx, y+dy, t+dt)$ 。对于同一个像素点来说, 在很小的时间间隔内, 其灰度值可近似为没有发生变化, 因此得出光流约束方程为

$$G(x,y,t) = G(x+dx, y+dy, t+dt) \quad (7-17)$$

将式 (7-17) 右边做泰勒展开, 并使 $dt > 0$, 可得到等式

$$G_x m + G_y n + G_t = 0 \quad (7-18)$$

式中, $G_x = dG/dx$, $G_y = dG/dy$, $G_t = dG/dt$, $m = dx/dt$, $n = dy/dt$ 。

上面的 G_x 、 G_y 、 G_t 可以用离散的差分来代替, 然后可以根据光流约束方程求出 m 和 n 。假设摄像机固定, 图像可分为运动的目标区域和静止的背景区域。静止的背景区域在理想情况下, 其光流为 0, 只有运动的目标区域才有光流。因此, 可求出光流梯度方向的速率, 即

$$v = \sqrt{m^2 + n^2} \quad (7-19)$$

根据光流约束方程推导出的光流速率表达式为

$$v = \left| \frac{G_t}{\sqrt{G_x^2 + G_y^2}} \right| \quad (7-20)$$

再设定一个阈值 T 把光流速率进行二值化, 有

$$O_i = \begin{cases} 1, & v_i(x, y) \geq T \\ 0, & v_i(x, y) < T \end{cases} \quad (7-21)$$

当 O_i 为 1 时, 当前像素点属于运动目标区域, 反之, 则属于背景区域。从而在得到所有像素点信息后, 就可以得到完整的运动目标区域。

3. 光流法优缺点分析

光流法的优点是, 无须了解场景的信息, 就可以准确地检测识别运动目标位置, 且在摄像机处于运动的情况下仍然适用。

光流法的缺点主要体现在, 计算量大, 耗时长, 在对实时性要求苛刻的情况下并不适用; 由于变化的光线会被错误地识别为光流, 因此该方法对光线敏感, 从而会影响到识别效果。

7.5 安防视频监控中的行为理解

7.5.1 视频监控中行为理解概述

在智能视频监控中, 需要对视频中的异常事件特别关注。因为我们监控的目的, 就是及时理解与处理监控场景中异常事件或异常行为, 发现是否有某种类型的危险活动, 并及时阻止危险活动的发生。显然, 对视频监控场景中的目标的行为, 进行检测识别、理解, 并对异常事件采取及时相应的处理措施, 是智能视频监控的首要条件。



1. 行为理解的难题

由于视频监控对象的动作往往是自然、连续的,而且与环境上下文有密切的联系,这都给行为识别或理解带来了如下一系列的难题。

(1) 如何通过融合多个摄像机的监控信息来克服光照、距离、视角、遮挡等环境因素带来的干扰和不确定性。

(2) 如何构建自然连续动作和行为的多层次模型,对视频监控目标行为进行分割和分类,而分割和分类又需要对动作和行为理解的高层模型进行指导。

(3) 如何考虑行为理解过程中的环境上下文信息,由于相同的行为在不同的情境下传递不同语义,对动作和行为理解需要了解当时视觉环境以及应用的情境。

2. 行为理解的含义

行为理解又称为行为识别,其特点为直接面向应用层,属于计算机视觉领域中的高层处理阶段。行为理解问题可视时为变特征数据的分类问题,即通过对运动对象的连续跟踪观察,将测试序列与预先设定的参考序列进行匹配,根据其匹配程度确定行为特征,进而对目标行为模式进行分析识别,并对该行为是否属于异常行为作出判断。

3. 国内外对行为理解的研究

目前,世界范围内人们已经开展了大量有关行为理解的研究工作。卡内基梅隆大学等著名研究机构在美国国防高级研究项目署(Defence Advanced Research Projects Agency, DARPA)资助下联合研制了为未来城市和战场监控应用开发的一种基于视频自动理解技的视频监控与监控系统;英国、葡萄牙和法国,在欧盟的资助下于2002—2005年联合开展CAVIAR(Context Aware Vision using Image-based Active Recognition)项目,目的是为了解决城市闹市的监控问题和对商业顾客行为的分析;英国的雷丁大学开展了对车辆和行人的跟踪及其交互作用识别的相关研究;IBM和Microsoft等公司也正逐步将基于视觉的手势识别接口、人体运动等人机交互技术应用于商业领域。

国内,中国科学院自动化所模式识别国家重点实验室、北京大学视觉与听觉信息处理国家重点实验室及清华大学等,对行为理解技术也都展开了相关的研究。

7.5.2 常用行为理解的方法

现阶段,常用的行为理解的方法主要有使用模板匹配法和状态空间法两种。

1. 模板匹配方法

(1) 模板匹配法的步骤。模板匹配法可以分为三步。

① 从输入图像序列中提取行为特征。

② 将该特征与在训练阶段预先保存好的模板进行相似度比较。

③ 从预先保存好的模板中选择与测试序列距离最小的所属类别作为被测试序列识别结果。

(2) 几种模板匹配法的改进方法。模板匹配方法是行为理解的基本方法,后续也出现了许多基于此的改进方法。

① Bobick 和 Davis 首先根据图像中目标运动信息的类型,将图像分为运动能量图像(MEI)和运动历史图像(MHI),然后采用马氏距离比较测试序列与给定模块系列之间的相似程度,根据相似程度大小确定最佳匹配行为。

② Masoud 等人则将目标行为描述为无限冲激响应滤波器响应,然后用测试序列点集和给定模块序列点集之间的 Hausdorff 距离来度量测试序列与模块序列之间的相似度,进而确定最佳匹配行为。

③ 还有学者采用 Procrustes 距离来度量测试序列与模块序列之间的相似程度,如 Veeraraghavan 等人用动态时间规整(Dynamic Time Warping, DTW)来匹配运动序列。

(3) 模板匹配法的优缺点。模板匹配方法的优点是实现简单、计算复杂度低,但只考虑单个序列的匹配程度,忽略了运动序列中相邻时序之间的动态特性,对于噪声和运动时间间隔变化比较敏感。

2. 状态空间方法

(1) 状态空间法的步骤。状态空间法大致也可以分为三步。

① 将每一种静态姿势定义为一种状态。

② 通过对静态姿势所组成的运动序列对状态空间进行遍历。

③ 在遍历过程中计算联合概率,寻找具有最大概率的行为模板,作为最佳匹配行为。

(2) 状态空间法是一个透明的层次事件结构。近年来,状态空间法已逐渐应用于人体行为理解的研究,通过合成简单事件来表示具有复杂时空关系的一般事件,并根据运动物体的属性,将最基本的时间定义为原子事件。

具有一系列连续性的原子事件构成了一个事件线程,具有时间、空间,以及逻辑关系的一系列事件组合成为多线程事件,最终建立起一个透明的层次事件结构,并形成了事件的自然语言描述。

(3) 状态空间法的优缺点。状态空间模型克服了模板匹配的缺点,已经被广泛运用于时间序列的预测、估计和检测,但涉及复杂的迭代运算,计算代价较高。

7.5.3 行为理解存在的问题及发展趋势

近年来尽管机器学习、人工智能、高性能计算等工具应用于构建行为模型、识别行为含义等取得了许多进展,但由于现实场景中运动的快速变化、光学的遮挡和光照变化、行为发生的场景和人运动的模糊性等因素的影响,导致行为理解成为一个复杂且极具挑战性的问题。行为理解的研究仍处于初级阶段,目前只能分析与理解比较简单的一些事件,如行走、跳、站起、坐等。随着光电信息技术与计算机软硬件等的发展,今后定会解决复杂场景的自然语言描述。

1. 行为理解存在的问题

(1) 运动特征选择与表达。如何选择合适的特征对运动进行充分表征,是行为理解的关键问题之一。首先,确定合适的特征数,若选取的特征过多、特征向量维数过大,则会增加计算的复杂度;而选择特征过少,又可能对行为无法进行准确的识别与理解。其次,能否通过借鉴人类的学习、识别与理解机理,定义合理的动态特征模型,解决该问题通常可以采用两种方法。



- 提取有关行为的主要特征,当主要特征不足以准确完成识别与理解时,系统逐步提取候选的细节特征。
- 采用行为的二维表达来捕捉行为的视觉不变特征,这样对行为理解不会引起歧义。

此外,运动特征选择与表达还存在一些行为理解的形象、如何对细微的时空变化采用合理的计算代价来表征等。

(2) 行为识别。目前行为理解研究仍局限于简单、固定视角且已切分好后的动作的研究。状态转移的图模型方法和模板匹配方法属于行为识别方法中较为常用的两种,它们在计算代价和运动识别的准确度之间进行折中,而且都是先训练后使用,只能识别训练中预先定义好的动作,忽视场景等背景知识,很难根据目标行为和场景的先验知识进行自动机器学习。

因此,行为识别领域仍亟待新技术的开发和应用,以便提高行为识别性能的同时,又能有效降低计算的复杂度。

(3) 高层行为与场景理解。同一行为、事件、状态在不同的场景有着不同的概念,因此本身具有一定的模糊性,而同一场景中有多个目标出现时,其行为模糊性将更加明显。借助于先进的视觉算法和人工智能等领域的成果,如何将现有的简单行为识别与理解,推广到更为复杂场景下的事件与场景理解,这也是将计算机视觉低、中层次的处理推向高层抽象的关键问题。

(4) 算法评价。鲁棒性、准确度、速度是人的行为识别的三个基本要求。行为识别需要在保证连续地工作的前提下,能够快速准确地识别运动,且不易受到噪声、光照、天气等因素的影响。目前的识别方法,更多关注的是识别率,对鲁棒性和速度两个指标研究要求很少。

2. 行为理解的未来发展趋势

(1) 音频与视觉信息相结合的多模态接口。目前,音频和视频的信号相对独立,而人的语言解释与可视化描述一样重要。为了完成深度和广度的分析,采用准确实时的多摄像机信息融合的方法,以便机器更好地理解人的通信行为,又要继承音频和视频信息用于多态用户接口。

(2) 人的运动分析与生物特征识别相结合。在某些特定的应用下,人的运动分析与生物特征识别相结合的需求日益突出,如军事安全基地的视觉监控系统、智能房间的门禁系统、高级人机交互等。近距离的监控,可通过跟踪人脸或者指纹等生物特征来进行身份识别;而远距离的监控中的人脸特征不易识别,但人的步态是可见的且具有易于感知、非侵犯性、难于伪装等优点,此时可通过人的步态与其他人体生物特征相结合,来进行身份识别。

(3) 人的运动分析向行为理解与描述等高层处理转变。行为理解最终目标,就是分析和理解人的个人行为、人与人之间及人与其他目标之间的交互行为等,其难点则在于特征选择和机器学习。如何借助先进的视觉算法和人工智能等领域的成果,将现有的简单行为识别与语义理解,推广为复杂场景的自然语言描述,也是行为理解今后的发展趋势。

光电信息存储技术及其 在安防中的应用

随着光电等科学技术的发展，人类步入了一个全新的数字化时代和信息时代。由于信息的多媒体化，人们处理的不仅是简单的数据、文字、声音、图像，而是由高清晰度和高质量的语音和运动图像等综合在一起的数字多媒体信息。由于需要处理、传输和存储的信息急剧增加，这对信息的存储和管理提出了越来越高的要求。为了满足信息社会的发展需要，光电信息存储技术应运而生，并成为现代信息社会中不可缺少的存储技术之一。

光电信息存储技术是一种非接触的写入和读出，其原理是利用材料的某种性质对光敏感的特性，当带有信息的光照射材料时，该性质即发生改变，且能够在材料中记录这种改变，从而就实现了光信息的存储。当用激光对存储材料读取信息时，读出光的性质随存储材料性质的改变而发生相应的变化，于是就能实现对已存储的光信息的读取。

现有的光电信息存储技术与传统的磁存储技术相比，具有如下特点。

- 理论估计光储存的面密度为 $1/\lambda^2$ （其中 λ 是用于光存储的波长）的数量级，存储的体密度可达 $1/\lambda^3$ ，因而数据存储密度高、容量大。
- 磁存储的信息一般只能保留 2~3 年；而光存储只要其介质稳定，寿命一般在 10 年以上，因而寿命长。
- 用光读/写和擦除是非接触式的，不会磨损和划伤存储介质，这不仅延长了存储寿命，而且使存储介质易于更换、移动，从而更容易实现海量存储。
- 由于光存储密度高，其信息位价格低，可比磁记录低几十倍。
- 由于是光，并行程度高，更不受电磁干扰等。

正是由于这些优点，光电信息存储技术自激光器发明以来，就一直受到人们的极大关注。目前，最普遍最成熟的光电信息存储技术是光盘存储技术。下面首先介绍光盘存储技术，接着介绍超大容量光带存储技术、全息存储技术、超高密度存储技术，以及它们在安防中的应用。

8.1 光盘存储技术

第一代光盘存储的光源用 GaAlAs 半导体激光器，波长为 $0.78\ \mu\text{m}$ （近红外），5 寸光盘的存储容量为 0.76 GB，即 CD 系列光盘；第二代光盘存储的光源用 GaAlInP 激光器，波长为 $0.65\ \mu\text{m}$ （红光），存储容量为 4.7 GB，即数字多功能光盘（DVD）系列；第三代光盘存储已经兴起，使



用 GaN 半导体激光器, 波长为 $0.41\ \mu\text{m}$ (蓝光), 存储容量可达 27 GB, 为高密度数字多功能光盘, 即 HD-DVD 光盘 (蓝碟)。20 世纪 80 年代后期出现的磁光盘 (MOD) 技术和 20 世纪 90 年代初期出现的相变光盘 (PCD) 技术也得到了飞快发展, 并且已经进入实用。

8.1.1 光盘存储的原理

光盘是一种圆盘状的信息存储器件, 它利用受调制的细束激光加热介质表面, 使不同位置处的反射率改变, 以记录下存储的数据。当有激光束照明介质层时, 依靠各信息点处反射率的不同提取出被存信息。在光盘上写入信息的装置称为光盘记录系统, 能从光盘上读出数据的装置是光盘重放系统。前者如光盘文件记录器, 后者包括视频光盘放像机和光盘文件检索系统等。图 8-1 给出了光盘写入读出的原理示意图。

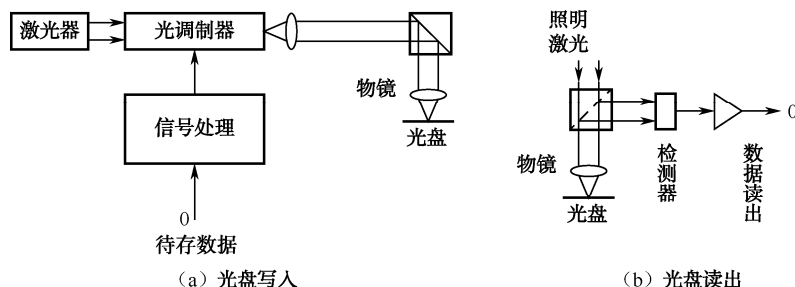


图 8-1 光盘写入读出原理示意图

光盘写入记录状态如图 8-1 (a) 所示, 载有音频、视频或文件信息的调制激光束被聚束透镜缩小成直径 $1\ \mu\text{m}$ 左右的光点。细束激光的高能量密度加热记录介质表面, 使局部位置发生永久性变形, 或者使金属膜的结晶状态发生变化。这些都造成介质表面反射率的二值化改变。经过适当处理之后, 在盘面上形成了轨迹为螺旋或同心圆状的一系列长短不同的微小凹坑或其他形式的永久性变形点。这些信息点的不同编码方式就代表了被存储的信息数据。

光盘读出状态如图 8-1 (b) 所示, 将照明激光束聚焦在光盘信息层上。当读出激光束落在光盘信息层的平坦区域时, 大部分光束被反射回物镜; 当光束落在凹坑边缘时, 反射光因衍射作用而向两侧扩散, 只有少量反射光能折回物镜; 当光束落在凹坑底部时, 由于坑深为 $1/4$ 波长, 使反射光波相位恰巧与坑上的反射光相反, 它们反相叠加的结果使坑内反射光最暗, 从而提高了信号的对对比度。用光电探测器接收反射回来的被信息点调制的光强, 则输出信号的电流 ΔI 可表示为

$$\Delta I = STE_0 R(x, y) \quad (8-1)$$

式中, E_0 为入射于介质膜上的激光束光强; T 为由介质膜到光电探测器的光传输效率; S 为光电探测器的灵敏度; $R(x, y)$ 是膜面反射率, 是信息点位置的函数, 随凹坑的有无呈二值化变化。

式 (8-1) 表明, 光盘存储是以记录介质表面的反射率 R 为信息的载体, 通过在薄膜介质上高密度的空间调制实现信息存储的。光电信息电流除用做数据信号经解调后变为再现信息之外, 还用来实现为光盘正常工作所必须的循迹跟踪和调焦控制。

一种基本的光盘存储系统如图 8-2 所示。

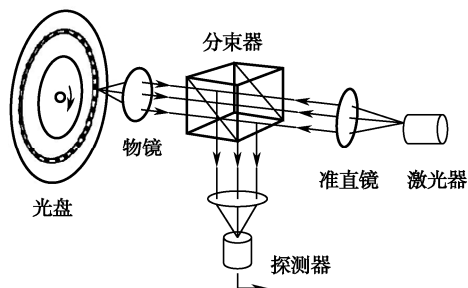


图 8-2 基本的光盘系统示意图

光盘是在衬底上淀积了记录介质及其保护膜的盘片，在记录介质表面沿螺旋形轨道，以信息斑的形式写入大量的信息（见图 8-3），其记录轨道的密度达 1 000 道/mm 左右。可见，信息斑越小，光盘的存储密度越大。由于物镜衍射极限影响焦点处光汇集的最小直径（约为 $\lambda/2NA$ 为物镜的数值孔径），因此光盘的存储密度为 $(NA/\lambda)^2$ 。例如，在采用氦离子激光器（ $\lambda=457.9\text{ nm}$ ）和物镜数值孔径为 0.8 的系统中，信息斑的最小直径为 $\lambda/(2NA)=457.9/(2\times 0.8)\approx 0.29\text{ }\mu\text{m}$ ，则存储密度为 $(NA/\lambda)^2\approx 3\times 10^{12}\text{ m}^{-2}$ 。对于普通尺寸（内径为 70 mm、外径为 145 mm）光盘而言，其有效存储面积约为 $5\times 10^{-2}\text{ m}^2$ ，则它的最大存储容量为 $3\times 10^{12}\times 5.0\times 10^{-2}=1.5\times 10^{10}\text{ b}$ 。可见，采用更短波长的激光器和高数值孔径的物镜，可以提高光盘的存储密度，如现在发展的蓝光光盘就比红光光盘的存储密度高得多。

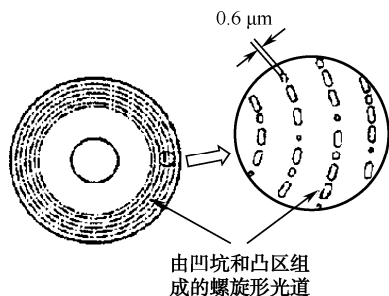


图 8-3 光盘记录斑示意图

光盘存储除了具有密度高、抗电磁干扰、存储寿命长、非接触式读/写信息及信息位价格低廉等优点外，还具有信息载噪比 CNB（载噪比是载波电平与噪声电平之比，以分贝 dB 表示）高的突出优点。其光盘载噪比均在 50 dB 以上，且不受多次读/写的限制。因此，光盘多次读出的图像清晰度和音质是磁带和磁盘所无法比拟的。

8.1.2 光盘存储的类型

光盘按读写方式的不同，可分为只读式、写入式和可擦除式三种。

1. 只读式光盘（第一代光盘）存储技术

只读式存储（Read Only Memory, ROM）光盘的记录介质主要是光刻胶，记录方式是先将信息刻录在介质上制成母盘，然后进行模压复制大量子盘。这种光盘只能用来播放已经记录在盘片上的信息，用户不能自行写入。它只能用来再现由专业工厂事先复制的信息，不能由用户自行追加记录，所以也称为专用再现光盘，如激光数字唱盘 CD、电视录像盘及在 CD 唱盘基础上开发的 CD-ROM 盘。

从信息存储的角度看，一张以光存储的 CD-ROM 完全可以看成一种新型的纸。一张小小的塑料圆盘，其直径不过 12 cm（5 英寸），质量不过 20 g，而存储容量却高达 600 MB。如果单纯存放文字，一张 CD-ROM 相当于 15 万张 16 开的纸，足以容纳数百部大部头的著作。但



是, CD-ROM 在记录信息原理上却与纸大相径庭, CD-ROM 盘上信息的写入和读出都是通过激光来实现的。激光通过聚焦后, 可获得直径约为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的光束。

最初的产品就是大家所熟知的激光视盘 (Laser Vision Disc, LD), 其直径较大 (12 英寸), 两面都可以记录信息, 但它记录的信号是模拟信号。1982 年, 由飞利浦和索尼公司制定了 CD-DA 激光唱盘的红皮书 (Red Book) 标准, 由此诞生了 CD-DA 激光唱盘。它把模拟的音响信号进行 PCM (脉冲编码调制) 数字化处理, 再经过 EFM (8~14 位调制) 编码之后记录到盘上。数字记录代替模拟记录的好处是: 对于干扰和噪声不敏感; 由于盘本身的缺陷、划伤或玷污而引起的错误也可以校正。CD-DA 系统取得成功以后, 很自然地想到利用 CD-DA 作为计算机大容量只读存储器。由此产生了 CD-ROM 的黄皮书 (Yellow Book) 标准, 以及 CD-ROM 的文件系统标准, 即 ISO 9660。因此, CD-ROM 在全世界范围内得到了迅速推广和越来越广泛的应用。东芝公司为 MSX 个人计算机配备了 CD-ROM, 它存储图像达 9 000 帧, 相当于数据容量 13 200 MB; 美国 STC 公司的 7600 型盘则达 40 000 MB 等。

CD-ROM 光盘不仅可交叉存储大容量的文字、声音、图形和图像等多种媒体的数字化信息, 而且便于快速检索, 因此 CD-ROM 驱动器已成为多媒体计算机中的标准配置之一。MPC 标准已经对 CD-ROM 的数据传输速率和所支持的数据格式进行了规定。MPC 3 标准要求 CD-ROM 驱动器的数据传输率为 600 kb/s (4 倍速), 并支持 CD-ROM、CD-ROM XA、Photo CD、Video CD 和 CD-I 等光盘格式。目前, 大量的文献资料、视听材料、教育节目、影视节目、游戏、图书、计算机软件等都通过 CD-ROM 来传播。

2. 一次写入式光盘 (第二代光盘) 存储技术

(1) 一次写入式光盘的基本概念。由于 CD-ROM 是只读式光盘, 因此无法利用 CD-ROM 对数据进行备份和交换, 更不可能制作自己的 CD、VCD 或 CD-ROM 节目。CD-R 的出现适时地解决了上述问题, CD-R 是 CD Recordable 的英文简称, 中文简称刻录机。CD-R 的另一英文名称是 CD-WO (Write Once), 就是只允许写一次, 写完以后, 记录在盘上的信息无法被改写, 但可像 CD-ROM 一样, 在 CD-ROM 驱动器和 CD-R 驱动器上被反复地读取多次, 所以也称为一写多读式光盘。

CD-R 盘与 CD-ROM 盘相比有许多共同之处, 它们的主要差别在于 CD-R 盘上增加了一层有机染料作为记录层, 反射层用金, 而不是 CD-ROM 中的铝。当写入激光束聚焦到记录层上时, 染料被加热后烧熔, 形成一系列代表信息的凹坑。这些凹坑与 CD-ROM 盘上的凹坑类似, 但 CD-ROM 盘上的凹坑是用金属压模压出的。CD-R 驱动器中使用的光学读/写头与 CD-ROM 的光学读出头类似, 只是其激光功率受写入信号的调制。CD-R 驱动器刻录时, 在要形成凹坑的地方, 半导体激光器的输出功率变大; 不形成凹坑的地方, 输出功率变小。在读出时, 与 CD-ROM 一样, 要输出恒定的小功率。

为使 CD-R 在 DOS 或 Windows 环境下对 CD-R 驱动器直接进行读写, 国际标准化组织下的 OSTA (光学存储技术协会) 制定了 CD-UDF 通用磁盘格式。Philips 公司推出的第四代 CDD2600 刻录机首先采用了 CD-UDF 文件格式, 并可在 Windows 环境下即插即用, 使 CD-R 技术的发展步入了一个新的里程。一写多读式光盘允许用户直接写入信息, 并可在写后直接读出 (DRAM), 但不能擦除, 因此它非常适用于存储需永久保存的图像或资料。目前, 这种光盘多使用 650 nm 的红色激光, 其记录单元凹槽的最小直径为 $0.4\text{ }\mu\text{m}$, 而使用短波长的蓝光, 其最小直径减小到 $0.14\text{ }\mu\text{m}$ 。因此, 蓝光 DVD 单面单层盘片的存储容量可达 27 GB, 是红光

4.7 GB 的近 6 倍。荷兰 Philips 公司在 2002 年 7 月已推出用蓝光 DVD 的袖珍产品, 虽然其盘片直径只有 3 cm, 其存储容量却达 1 GB, 而驱动器非常小 ($5.6\text{ cm} \times 3.4\text{ cm} \times 0.75\text{ cm}$), 因而可放入数码相机, 掌上电脑及手机当中。

(2) 一次写入式光盘的类型。根据用途, 写入式光盘可分如下三类。

① 图像存储光盘。该光盘记录介质为碲碳合金, 数据传输率为 1 Mb/s。日本 NEC 公司的 N7921 光盘组的容量为 48 000 MB。数据传输率为 0.785 Mb/s。

② 编码存储光盘。该光盘记录介质为碲硒合金, 有较高的数据传输率、较低的误码率。例如, 美国 STC 公司 1984 年提供的产品其数据传输率为 24 Mb/s, 误码率为 10^{-12} , 容量为 40 000 MB; 日立 1986 年提供的 301 子系统, 一台计算机可连接 4 台驱动器, 误码率为 10^{-12} , 容量为 20 800 MB, 平均存取时间为 250 ms。

③ 电视存储光盘。该光盘记录介质是碲的氧化物, 容量为 11 200 MB, 可存储彩色图像 3 万幅以上, 有的产品可存储 X 光图像。

(3) 一写多读式光盘存储的优点如下。

- 存储密度高, 容量大 (5.25 英寸光盘可存储几万幅彩色的数字图像);
- 光盘的可靠性极高;
- 录有图像的盘片可以从光驱中取出, 并保存到安全的地方;
- 光盘的价格比较合理;
- 光盘的使用寿命无限, 其最小平均无故障时间超过 10 年。

3. 可擦除式光盘 (第三代光盘) 存储技术

可擦除式光盘是第三代光盘存储技术, 即可多次写入、读取信息, 也称为可读写光盘 (CD-ReWritable, CD-RW), 主要有磁光盘 (Magneto-Optical Disk, MOD) 和相变光盘 (Phase Change Disk, PCD) 两种。

(1) 可擦除式磁光盘。可擦除式磁光盘采用磁光技术来记录数据, 其容量为 200~600 MB, 它是指利用激光与磁性共同作用的结果记录信息的光磁盘。

① 可擦除式磁光盘的工作原理。磁光盘是在光盘技术基础上发展起来的利用光热效应的信息存储系统。它的基本设备也和光盘装置相类似, 与光盘间的主要区别在于采用了磁性记录介质。在细束激光的调制作用下, 通过改变介质的磁化方向完成信息的存储。在信息读出时不是检测光的反射率, 而是检测信息点处的磁化方向。

图 8-4 给出了磁光盘的写入、擦除和读出原理。在如图 8-4 (a) 的写入状态下, 应先将磁性薄膜相对膜面作取向朝下的垂直磁化。将此磁膜置于取向向上的写入磁场 H 中, 并用细束调制激光使局部加热, 于是该信息点处的磁化方向反转为取向向上, 记录下被存储的信息。为了擦除掉已记录的信息, 如图 8-4 (b) 所示, 可用取向向下的擦除磁场和激光束相互作用实现。常用的磁光盘读出方法有以下两种。

(a) 法拉第效应读出法。利用线偏振光照射磁膜上的信息点, 由于磁光效应的影响, 反射光的偏振方向随磁化方向而异。用检偏器将不同偏振方向转换为输出光强的变化, 经光电探测器件即能读出已存储的信息。这种方法一般只用于聚碳酸酯、有机玻璃等透明物质。

(b) 克尔效应读出法。此方法可用于各种材料的盘基。用一束偏振光分别照射到磁化区, 不同方向的磁化区使反射的偏振光方向分别产生左旋和右旋, 如图 8-4 (c) 所示; 然后通过方解石晶体使光束偏转而改变方向; 再用光电二极管检测读出。所检测的信号电流 ΔI 可表示为

$$\Delta I = 2STRE_0 \sin 2\theta \cdot \varphi(x, y)$$

式中, E_0 为入射偏振光强; S 为光电检测器灵敏度; T 为光路传输效率; R 为磁膜反射率; θ 为检偏器对入射线偏振光的设定角; $\varphi(x, y)$ 为克尔旋转角, 取决于信息点处的磁化方向, 是磁光盘位置的函数。

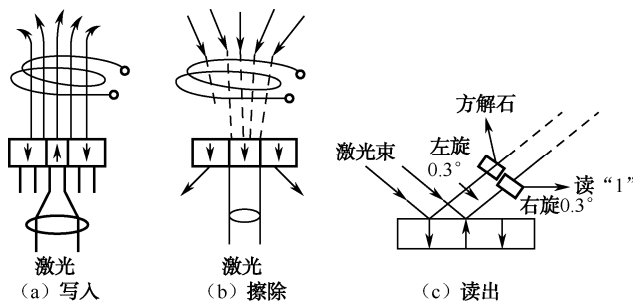


图 8-4 磁光盘存储的写入、擦除和读出原理

可擦除式磁光盘录像机如图 8-5 所示。

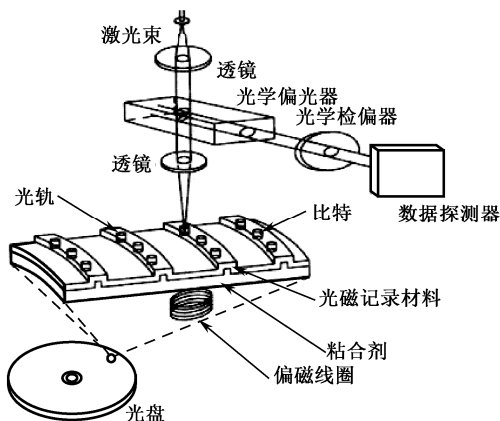


图 8-5 可擦除式磁光盘录像机示意图

由图可见, 它的操作方式与硬磁盘完全相同, 但其容量比一般硬磁盘要大得多。改写这种光盘数据的方法也非常简单, 利用激光束将光盘上的某个点加热到磁记录材料的居里温度, 并施加特定方向的磁场, 其磁记录单元的磁性就可以改变, 这样就修改了数据。要读取数据时, 需先用低功率的激光束照射光盘表面, 再通过读取记录单元反射的光束来探知该单元的极性。一般, 每个单元可以记录一个比特的信息: 0 或 1。磁光盘记录的图像都有各自的编号, 采用随机访问的方法, 可很容易地读出所需的图像, 而查找和读取图像只需要不到 1 s 的时间。一般地, 普通光盘的容量约为 800 MB, 它可存储 1 万幅未压缩的彩色画面。1 张 5.25 英寸光盘的存储量等同于 31 卷数据磁带。

② 可擦除式磁光盘的优点如下。

- 像磁盘一样可以重复使用;
- 存储容量大;
- 便于携带;
- 可随机读出, 且读取时间不到 1 s;

- 使用寿命长和可靠性高;
- 不怕灰尘、摩擦等破坏因素。

MOD 虽然比硬盘和软盘便宜和耐用,但与 CD-R 盘片相比显得比较昂贵。目前,130 mm (5.25 英寸) 磁光盘及 90 mm (3.5 英寸) 磁光盘已相继投入市场,其容量分别可达到 640 MB 及 128 MB。与硬磁盘相比,它们具有可随意更换、非接触读写、信息信噪比高、每位信息价格比低等优点,其每片容量及存储密度也很大。可擦写光盘从一问世即呈供不应求之势,世界各大公司都投入巨资大量生产。日本佳能公司的 130 mm 磁光盘驱动器已被选为美国 Next 计算机的主存储器,而温盘驱动器仅作为任选附件。为实现 1 GB 的主内存的计算机,其外存容量要求 4.5~10 GB 的大容量。这为目前 90 mm 光盘的 40~100 倍、130 mm 光盘的 8~20 倍。因此,制造更大容量的光盘,已为当务之急。

(2) 可擦重写相变光盘。可擦重写相变光盘是用激光技术来记录和读出信息,其容量为 128 MB~1 GB。与磁光盘相比,由于相变光盘仅利用光学原理来读写数据,所以其光学头可以做得相对简单,它用一束激光,一次动作在完成写入新信息的同时自动擦除原有信息。因为它利用某些材料在激光作用下可实现晶态与非晶态间相互转化的特性,使记录介质在写入激光束的粒子作用下快速晶化,从而实现信息的存储。这种光致晶化的可逆过程非常快,因而可大大缩短了数据的存储时间。又由于相变光盘的读出方式与 CD-ROM、WORM 相同,所以多功能的光盘驱动器就变得容易实现。这种利用记录介质在两个稳定态之间的可逆相结构变化来实现反复的写和擦的相变光盘,其相结构变化如下。

- 晶态 I 与晶态 II 之间的可逆相变,这种相变反衬度太小,没有使用价值。
- 非晶态 I 与非晶态 II 之间的可逆相变,这种相变的反衬度也太小,也没有使用价值。
- 发生玻璃态与晶态之间的可逆相变,这种相变有使用价值。

①相变光盘存储原理与过程。当近红外波段的激光作用在介质上时,能加剧介质结构中分子、分子的振动,从而加速相变的进行。近红外激光对介质的作用以热效应为主,其中写、读、擦激光与其相应的相变过程如图 8-6 所示,图 8-6 (a) 是用来写入、读出及擦出信息的激光脉冲,图 8-6 (b) 表示出在这三种不同的脉冲作用下,在介质内部发生的相应的相变过程。

现将图中写/读擦激光脉冲与其相应的相变过程说明如下。

(a) 信息的记录(即信息的写入)。即对应介质从静态 C 向玻璃态 G 的转变。选用功率密度高、脉宽为几十至几百 ns 的激光脉冲,使光斑微区因介质温度刹那间超过熔点 T_m 而进入液相,再经过液相快速完成,达到玻璃态的相转变。如介质的熔点 $T_m=600\text{ }^{\circ}\text{C}$,激光的脉宽 $\tau=100\text{ ns}$,则快淬过程的冷却速率约为 $6\times 10^9\text{ }^{\circ}\text{C/s}$,从而很快就使介质的光照微区进入玻璃态。

(b) 信息的读出。用低功率密度、短脉冲的激光,扫描信息道,从反射率的大小辨别写入的信息。一般介质处在玻璃态(即写入态)时反射率小,处在晶态(即擦除态)时反射率大。在读出的过程中,介质的相结构保持不变。

(c) 信息的擦除。对应介质从玻璃态 G 向晶态 C 的转变。选用中等功率密度、较宽脉冲的激光,使光斑微区因介质温度升至 T_m 处,再经过成核-生长完成晶化。在此过程中,光诱导缺陷中心可以成为新的成核中心。因此,由于激光作用使成核速率大大增加,从而导致激光热晶化比单纯热晶化的速率要高。

总之,激光热致相变中通过成核-生长过程完成晶化:随着温度升高,非晶薄膜中有晶核形成,晶粒随温度升高而长大。激光作用使这一过程速度加快。

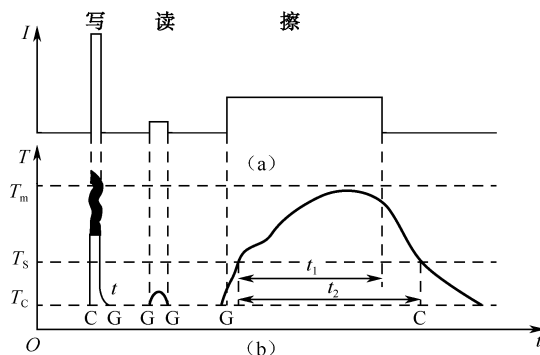


图 8-6 写/读擦激光脉冲与其相应的相变过程

② 激光光致相变。随着激光波长移向短波长，激光的光致相变结构变化效应逐渐明显，相变机制也与热相变的机制不同。研究表明，符合化学计量比的介质不仅可以用单纯加热的方式使之晶化，还可以不加热，通过激光束或电子束的粒子作用，在极端时间内完成晶化的全过程。这一过程中，介质在光激发作用下，通过无原子扩散的直接固态相变，实现从玻璃态到晶态的突发性转变，在晶化突然发生的瞬间，介质中光照微区的温度还来不及升高至晶化温度 T_c 之上，因而相变速度极快。光致相变介质内部光吸收过程如图 8-7 所示。

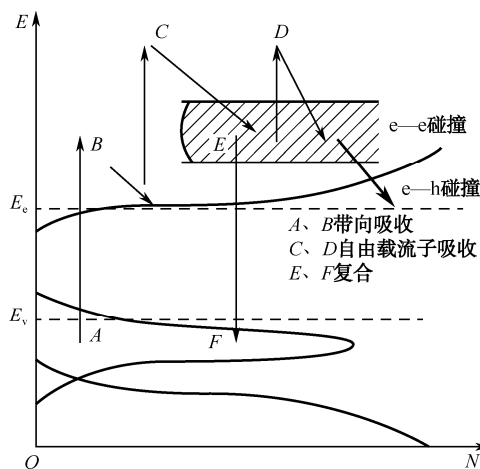


图 8-7 光致相变介质内部光吸收过程

由于入射激光束不与非晶网络直接作用，光子能量几乎直接用来激发电子，用 N 表示任意时刻受激载流子浓度。若激光束的光子能量是 $h\nu$ ，介质的吸收功率密度是 ρ ，则自由载流子的产生率 $R_e = \rho/h\nu$ 。用 R_r 表示电子与空穴的复合率， R_c 表示电子与网络作用时将能量传递给声子的概率。在高功率密度的激光作用下， $R_e \gg R_r$ ， $R_c \gg R_e$ 。可见，这时介质内部的光吸收由带间吸收为主变为以自由载流子浓度猛增，从而使得电子-电子 (e-e) 碰撞的概率 (正比于 N^2) 远远超过电子-网络碰撞的概率 (正比于 N)，自由载流子吸收的光能远比它与网络作用损失的能量为高，形成温度很高的电子-空穴等离子体，但网络的温度变化不大。

激光脉冲结束后，等离子体中的过热电子在与声子相互作用 (e-h 碰撞) 过程中将能量传递给网络，或与空穴复合而释放能量，最终使介质回到自由能最低的晶态。对于组分符合化学计量比的介质，在光晶化的过程中没有长程原子扩散，只有原胞范围内原子位置的重新调整。

所以光晶化的机制是一种无扩散的跃迁复合机制。它利用弛豫过程和复合过程释放的能量，促成网络原胞内原子位置的调整，以及键角畸变的消失，从而完成晶化的全过程。

由此可见，光致晶化过程包括光致突发晶化和声子参与的弛豫过程，前者需时在 $10^{-12} \sim 10^{-9}$ s 量级，后者约几十 ns。它与激光热致晶化过程的对比参见表 8-1。

表 8-1 激光热致晶化与光致晶化过程对比

项 目	热 致 晶 化	光 致 晶 化
本质	扩散型成核——长大式晶化过程	非扩散型跃迁——符合式晶化过程
条件	符合或不符合化学计量比的组分；所用的亚稳相	符合化学计量比组分；直接固态相变，无须成核
起因	热致起伏	激光束激发或电子束激发
耦合性质	相分离，原子扩散；原子振动；分子振动	无相分离，无扩散；原子位置调整；键角畸变消失
自持效应	不重要	自持晶化，重要
穿透深度	整体效应	激光束： $10^2 \times 10^{-10} \sim 5 \times 10^3 \times 10^{-10}$ m ($100 \sim 5\,000$ Å)； 电子束： $1 \sim 2$ μm
晶化时间	较长的退火过程 ($0.5 \sim 1.0$ ms)	突发作用 ($1\text{ns} \sim 1\text{ps}$) + 弛豫过程 ($10 \sim 200$ ns)

③ 可擦重写光盘存储机构。可擦重写光盘在记录信息时一般需要将信道上原有信息擦除，然后写入新信息。这可以是一束激光的两次动作，也可以是两束激光的一次动作，即用擦除光束之后写入光束的协调动作来完成擦、写功能。

图 8-8 是可擦重写光盘存储机构与信息存储过程示意图。图 8-8 (a) 中的虚线框内是一个双光束光学头，或称为光学读写头。图中 1、2 和 3 分别为写入激光光斑、擦除激光光斑和写入的信息道，激光聚焦在盘面上的写入光斑 $1'$ 、擦除光斑 $2'$ 和写入的信息 $3'$ ，都在图 8-8 (b) 中放大示出。读写头的左侧以半导体激光器 λ_1 为光源的光路是写读光路；右侧以 λ_2 为光源的光路是擦除光路。

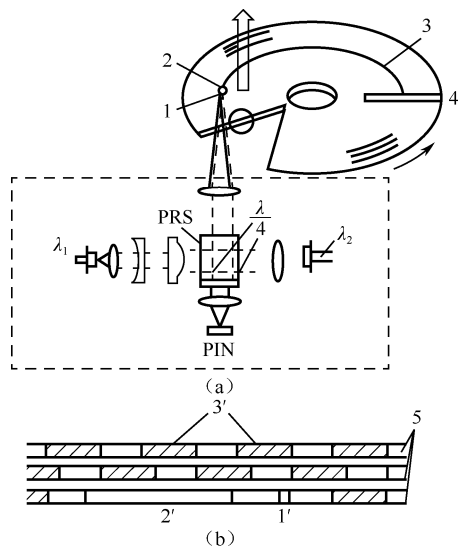


图 8-8 可擦重写光盘存储机构与信息存储过程

由于擦信号的脉宽较宽，必然影响光盘数据传输速率提高，并带来光盘驱动器设计与制作



上的复杂性。为了能像磁盘那样具有在记录新信息的同时自动擦除旧信息,就必须寻找快速晶化即快速擦除的光存储材料,实现真正的直接重写光盘存储。

④ 相变光盘的优点。

- 利用由介质材料的结晶相变化而引起的反射率变化进行记录和擦除,其信号电平比磁光材料高几个数量级,因而信噪比高。
- 由于不需要磁场元件,因而所用光学头的结构简单,质量轻,易实现集成化,有利于提高伺服跟踪精度和数据传输速率。
- 相变材料的稳定性好,成本较低。
- 相变光盘驱动器可以兼容一次写入和可擦重写两种相变光盘。
- 由于上述优点,相变光盘被认为是未来最有潜力的。

多年来,人们研究了多种体系的相变型光存储记录介质,如金属合金材料具有化学稳定性好和相变速度快的优点,越来越多地引起了人们极大的兴趣。研究表明,Cu-Ag、Cu-Al、Al-Ag等合金材料中,除Cu-Ag薄膜外,其他几种合金薄膜材料都在一定范围内形成非晶态

薄膜,它们在晶化过程中普遍有多级亚稳态出现。由于多种亚稳相共存,通过选择合适的激光功率和脉冲宽度,可以实现对晶化相的选择控制,以达到最佳的写/擦效果。目前,相变光盘材料还需研究解决高速擦除与高稳定性之间的矛盾,多次(大于10次)重复擦写等。

为使可擦写相变光盘与CD-ROM和CD-R兼容,早在1995年4月,飞利浦公司就提出了与CD-ROM和CD-R兼容的相变型可擦写光盘驱动器CD-E(CD Erasable)。CD-E得到了包括IBM、HP、Mitsubishi、Mitsumi、松下电器、Sony、3M及Olympus等公司的支持。1996年10月,Philips、Sony、HP、Mitsubishi和Ricoh五家公司共同宣布了这一新的可擦写CD标准,并将CD-E更名为CD-RW(CD-ReWritable),CD-RW标准的制定标志着工业界可以开发并向市场提供这种新产品,CD-RW是一个已经得到众多公司和用户普遍支持的可擦写光盘标准。由于CD-RW仍沿用了CD的EFM调制方式和CIR检/纠错方法,CD-RW盘与CD-ROM盘具有相同的物理格式和逻辑格式,因此CD-RW驱动器与CD-R驱动器的光学、机械及电子部分类似,一些零部件甚至可以互换,这就降低了CD-RW驱动器的成本,使它能迅速在可擦写光盘产品市场占有一定的份额。

PD是Phase Change ReWritable Optical Disk的简写,它是松下公司采用相变光方式(Phase Change)存储的可重复擦写存储设备,是一种比CD-RW性能更好、运行更稳定的光盘介质驱动器。PD驱动器的运行速度较低,可以兼容CD-ROM。使用专门PD光盘,可重复擦写大约50万次。PD的平均寻址时间为89 ms,数据传输率为518~1 141 Kb/s,相当于八速光驱,写入并校验时的数据传输率为300~600 Kb/s,相当于四速光驱。除了可以读写PD光盘外,也可以当作普通的八倍速CD-ROM使用。

8.1.3 光盘存储器

光盘存储器由光存储盘片及其驱动器组成,驱动器提供高质量的读出光束,引导精密光学头、读出信息,给出检测光盘聚焦误差信号并实现光束高精度伺服跟踪等功能。

1. 光盘存储器的光学系统

光盘存储器的光学系统一般都采用半导体激光器作为光源,采用一束激光、一套光路进行

信息的写/读（如只读存储器及一次写入存储器）；或用两个独立的光源、配置两套光路，一套用来读/写，另一套用来擦除（如可擦重写存储器）。直接重写式相变光盘存储器，只需一束激光、一套光路完成全部读、写、擦功能，可与一次写入存储器兼容。

光盘存储器的光学系统，大致可分为单光束光学系统和双光束光学系统两类。单光束光学系统适合于只读光盘和一次写入光盘，具备信息的写/读功能，而双光束光学系统用于可擦重写光盘。下面以图 8-9 所示的双光束光学系统为例，做一简介。在图中，器件 1~8、10~13 构成写/读光路，器件 14~19、5~8、20~21 构成擦除光路，9 是可擦重写的光盘。其中关键器件的作用如下：1 为写/读激光器（ $0.83\text{ }\mu\text{m}$ ）；5 为二向色反射镜，它只反射特定波长的入射光；11 为刀口，将从光盘反射回来的激光分割为两部分，分别进入探测器 12 和 13，得到读出和聚焦、跟踪误差信息；18、19 为一对正、负柱面透镜，改变光束为椭圆截面，以利擦除；17 为偏振分束器；14 为擦除激光器。

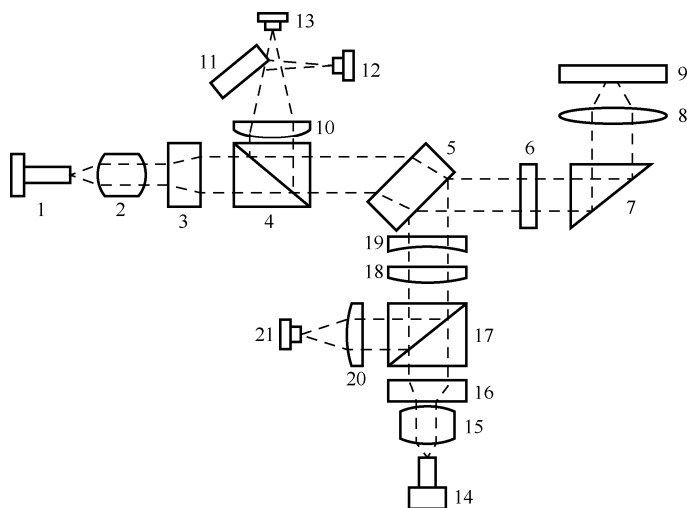


图 8-9 光盘存储器的双光束光学系统

光盘存储技术具有低成本、可大量模压复制等优势，这是其他光存储技术难以替代的。但目前光盘的直接重写性能仍然不及磁盘，所以光盘存储技术是在提高其存储密度优势的同时，正在继续研究新的直接重写技术，以及如何提高数据存储、传输的速率等。随着短波波长激光技术和其他光学存储技术的成熟，以及新存储介质材料的发现，光盘存储技术还将有更大发展。

只读式、一次写入式、可擦重写式光盘，这三种形式系统的结构十分相似，都是使激光在旋转的光盘表面上聚焦，通过检测从盘面上来的反射光的强弱，以读出记录的信息。其中，只读式光盘上已记录的信息只能读出，用户不能修改或写入新的信息；一次写入式即 DRAW（Direct Read After Write）光盘，是用会聚的激光束的热能，使盘面材料的形状发生永久性变化而进行记录的，因而是一种记录后不能在原址重新写入信息的不可逆记录系统，它既可用于存储图像，文件和档案资料，也可用于计算机的外存储器；可擦式光盘存储器是可以写入、擦除和重写的可逆型记录系统，它利用激光照射，引起介质的可逆性物理变化而进行记录。这三种光盘存储器的机电结构与主要技术基本相似。其主要区别在于存储介质和记录机理不同，因而写入和读出信息的方法也不尽相同。

2. 光盘存储系统的组成与工作原理

光盘存储系统的组成与工作原理,如图 8-10 所示,该系统的功能部件如下。

(1) 激光源和与之相连形成读/写光点的光学系统,通过它可以数据写入或读出。

(2) 检测和校正读/写光点与数据道之间的定位误差的光电系统。通过光电检测器产生聚焦伺服与跟踪伺服信号,根据这些信号在与光盘垂直的方向上移动聚焦透镜,在光盘的半径方向上移动聚焦镜或使跟踪反射镜偏转,即可相应地实现聚焦控制和跟踪控制,把激光聚焦在光盘的记录层上,使光点中心与信道中心吻合。

(3) 检测和读出数据的光电系统。通过数据光电检测器产生数据信号,在记录过程中还产生形成凹坑(或其他信息标志)的监测信号。

以上三部分组成小巧的光学读/写头,简称光头,即图中的点画线框内的部分。

(4) 移动光头的机构。光头安置在平台或小车上,并与直线电机连接,以便在径向读/写数据,校正光盘的偏心。

(5) 写/读数据通道中的编码/译码,以及误差检验与校正(即 ECC)电路。

(6) 光盘,即数据存储媒体。

(7) 光盘旋转机构。由直流电机转动光盘,通过旋转编码器产生伺服信号,控制光盘转速,以便进行写/读操作。

(8) 光盘机的电子线路。包括所有运动机构的伺服电路和把数据传送到光盘以及从光盘上输出数据的通道电路。

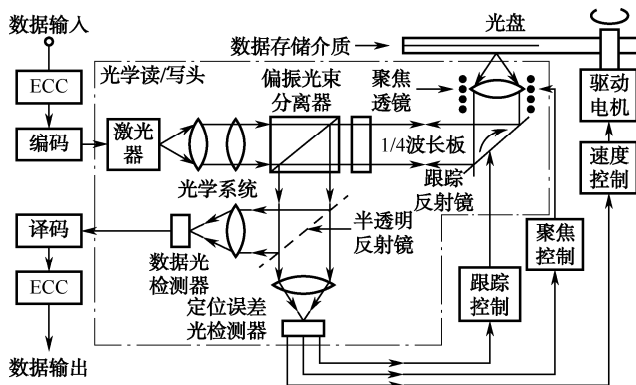


图 8-10 光盘存储器组成框图

3. 光盘存储系统的数据通道

光盘存储系统的数据通道如图 8-11 所示,由图可知,用户数据通过接口被送进输入缓冲器,缓冲器可提供“弹性”存储能力,以适应变化着的输入数据速率。数据从输入缓冲器以称为子块的字符组形式进入记录格式器。每个子块要通过错误检测与校正编码器,加入奇偶校验位,以便随后读出时进行错误校正。记录格式器将子块组成地址块,在其上加入地址信息,以便读出时的数据检索。最后,记录格式器将地址块编组成若干字节的面向用户的数据块,在读出时可随机检索出最小数据单位。格式化数据从记录格式器送到光盘机的记录电路,在该处将数据编成记录代码,并加上识别地址的信息,然后送往光学读/写头,把数据记录到光盘上。

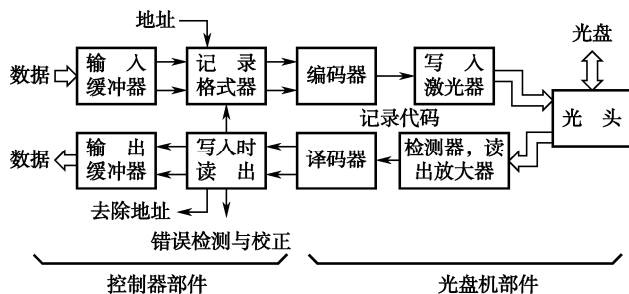


图 8-11 光盘存储器的数据通道

读出电路检测并解调从光盘上来的反射光，将信号送至控制部件的读出格式器。它校正数据中的任何错误，除去记录时所加的用于识别信道的地址信息，并重新组织位序列，使之与输入到格式器的序列一致。最终的读出数据，被送到输出缓冲器，缓冲器再按要求的数据速率，将数据传送给用户。

8.2 大容量光带存储技术

随着多频道多媒体时代的来到，要求图像素材的有效应用日益提高，因此，需要一种可以代替过去录像带的在小盒内可长期保存，并可多次再生的大容量记录存储媒体。这种大容量记录存储媒体，不光是电视领域需要，在计算机和通信领域，随着静止图像和动态图像等信息量多的数据自由处理，也期待出现一种在光盘和磁盘中不能实现的大容量、高可靠性的记录存储媒体。而光带录像机就能满足这一要求。

这种光带存储系统，可以实现磁盘、光盘、磁带等不能实现的高可靠、大容量记录。这在多媒体时代的需要是很大的。下面就简要介绍一下这种光带（实际是磁光带）记录存储设备的基本结构原理及其应用领域。

8.2.1 大容量光带存储系统的结构原理及类型

1. 大容量光带存储系统的结构原理

光带存储系统的基本结构原理如图 8-12 所示。把光带装在密封的盒内，通过透明窗用激光进行存储、再生。这种系统利用了四束激光，激光从旋转型光头中射出，在光带上呈圆弧状扫描，其进行存储和再生的扫描角为 90° 左右。

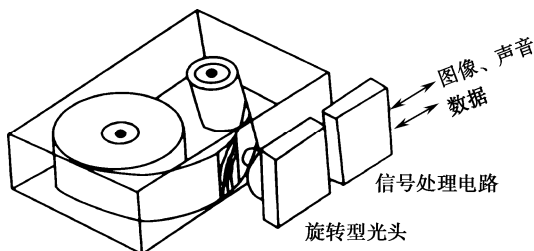


图 8-12 光带存储系统的基本结构



旋转型光头的光学系统分为固定部和旋转部。固定部有激光器,有用于检测信号再生和聚焦误差的光学系统,以及进行聚焦控制及跟踪控制的光学系统。旋转部是一种只有物镜和改变光路棱镜的最小结构,它利用中空结构的马达进行高速旋转及提高数据传输速率。设置在两个互相垂直方向的变位的执行元件上,是用于聚焦控制和跟踪控制的聚焦与跟踪透镜,利用光轴方向的变位执行元件控制聚焦,利用平行于光带长度方向的变位执行元件控制跟踪。

固定部和旋转部之间的信号传送并不是电气信号的输入输出,而是用光的空间进行传送。为了存储、再生电视的高品质的数字动态图像,需要 100 Mb/s 以上的数字传送速率,为此其有效手段是对旋转光头进行多光束化,所以这里应用了 4 个光束。这种光带存储系统采用激光存储,因此可以实现高密度存储,并且它具有如下特征。

- 无光带摩擦,可无论多少次的再生,因为它是非接触记录和再生的。
- 防尘性好、可靠性高,因为它可做成密封盒式结构。
- 光带行走系统简单,可高速存取,因为不需把光带拉出盒子。

2. 光带的类型

光带存储媒体,有两种类型。

- 可擦型光带:在可擦型光带中,采用磁光存储媒体。
- 追记型光带:在追记型光带中,采用与 CD-R 一样的有机色素材料。

8.2.2 大容量光带存储的方式及与磁光盘的比较

1. 光带存储的方式

光带存储兼有可以高密度存储的光存储特征,以及可以扩展存储媒体面积的磁带存储特征。光带存储与光盘相比,存储面积可以高 2~3 个数量级以上。

随着激光器的短波长化,以及近场光学、超分辨率、信息处理等技术的发展,光盘的存储容量为几十 GB,而光带通过利用光盘的高密度技术,在 VHS 磁带盒光带上,可实现 1 TB 以上的存储容量。

光带存储系统,具有下列几种方式。

- 使光带圈在旋转滚筒上,用固定光头进行存储的方式。
- 光头在光带上往复运动进行存储的方式。
- 像 VTR 那样,光头内藏在旋转滚筒内进行存储的方式。
- 利用多角镜使光带上的光头以微小区间高速运动进行存储的方式等。

2. 可擦除磁光带与磁光盘比较

图 8-13 为磁光带和磁光盘的剖面结构,由图可知,在光盘中应用 4 层结构,而在光带中应用 3 层结构。为了制作长的磁光带,必须简化媒体结构和制造工艺。为了避免基底薄膜双折射的影响,同时为了形成记录层一侧与行走机构不接触,磁光带以记录层一侧入射激光。这正好与磁光盘相反,实际上,三层结构可实现与 4 层一样的品质因素(FOM)。

用磁光带反复进行了记录、擦除,其结果表明:重复 1 万次擦除也可得到与 4 层媒体一样的特性,因此反复记录、擦除不会出现问题。

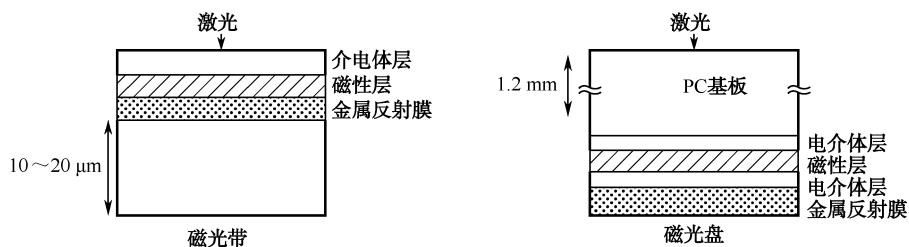


图 8-13 磁光带和磁光盘的剖面结构

8.3 全息存储技术

自激光全息技术诞生之日起,激光体全息光存储技术(以下简称全息存储)就开始受到人们的关注。目前,全息存储研究已取得很大进展,存储容量迅速增大,存储器性能不断改进,高密度全息存储技术正日益走向实用。

8.3.1 全息存储的原理

全息存储方式是利用光的干涉原理,在记录材料上以体全息图的形式记录信息,并在特定条件下以衍射形式恢复所存储的信息。三维多重体全息存储,是利用某些光学晶体的光折变效应记录全息图形图像。一般常用的材料有重铬酸盐明胶、光致聚合物和光致变色材料等。

三维体全息存储的原理是,待存储的数据由空间光调制器调制成二维信息,然后与参考光在记录介质中发生干涉,并利用材料的光折变效应形成体全息图而完成信息的记录。读取时,使用和原来相同的参考光寻址,以读出存储在晶体中的相应的全息图。根据体全息图的布拉格角度或波长选择性,改变参考光的入射角度或波长,以实现多重存储。由于布拉格选择性非常高,所以体全息存储可在一个单位体积内复用多幅图像,从而实现超高密度存储。

根据光波干涉原理,当信号光和参考光都是平面波时,在一定厚度的记录介质内部都会形成等间距的、具有平面族结构的体光栅,从而实现了对光信号的存储。

体全息图光路示意图如图 8-14 所示。

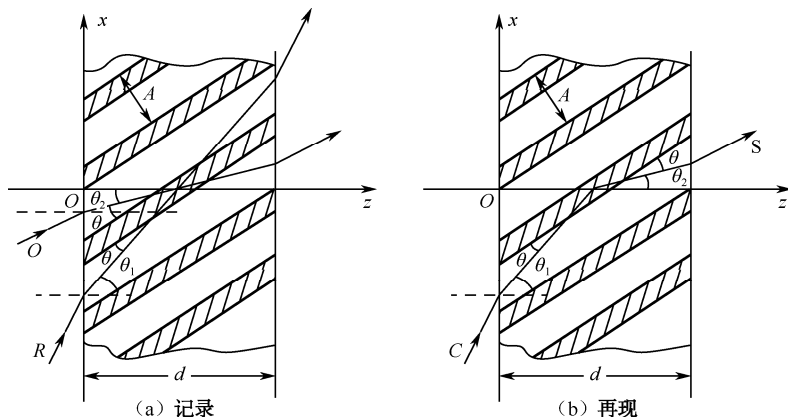


图 8-14 体全息图光路图示意图



光信号存储时,待存储的信号光 O 和参考光 R 分别以角度 θ_1 和 θ_2 入射入介质内,形成的条纹面与两束光的夹角 θ 满足 $\theta = (\theta_1 - \theta_2)/2$ 。该等间距的平面族结构被记录并形成光栅(其光栅常数 Λ 满足布拉格条件: $2\Lambda \sin \theta = \lambda$, 其中 λ 为光波在介质内传播的波长),从而实现某波长光信号在某角度下的存储。

体全息图对再现光的衍射作用与布拉格晶体对 X 射线的衍射现象相似,也满足布拉格条件: $2\Lambda \sin \theta = \lambda$, 式中 θ 称为布拉格角。图 8-14 (b) 是其再现示意图。只有满足布拉格条件的再现光才能得到最强的衍射光,任何对布拉格角和光波长的偏离都会使衍射光急剧衰减,即布拉格条件表现出很强的选择性。当某一波长的光以某一角度入射到存储介质的某一区域(该区存有数据信息)时,如果出现较强的、满足布拉格条件的衍射光,则表示该区域在该波长和角度下的存储信息为 1,反之则为 0。由此可见,体全息可采用波长复用和角度复用来实现超高密度存储。

8.3.2 全息存储的特点

与磁存储技术和光盘存储技术相比,全息存储有以下特点。

(1) 数据冗余度高。在传统的磁盘或光盘存储中,每一数据比特占据很小的空间位置,当存储密度增大,存储介质的缺陷尺寸与数据单元大小相当时,必将引起对应数据失真或丢失;全息存储的信息是以全息图的形式存储在一定的扩展体积内,而记录介质局部的缺陷和损伤只会使信号的强度降低,而不至于引起数据丢失,因此冗余度高,抗噪能力强。

(2) 存储容量大。利用体全息图可在同一存储体积内存储多个全息图,其有效存储密度很高,存储密度的理论极限值为 $1/\lambda^3$ (λ 为光波波长),在可见光谱区中该值约为 10^{12} b/cm^3 。

(3) 数据并行传输。全息图数据以页面形式存储和恢复,一页中所有的位都并行地记录和读出(不像磁、光盘那样串行方式逐点存取),其存取一页的时间 $\leq 1 \text{ s}$,因而具有极高的数据传输率,其极限值主要由 I/O(输入/输出)器件来决定。目前多信道 CCD 阵列的运行速度已达到 128 MHz,采用并行探测阵列的全息存储系统的数据传输率将有望达 8 GB/s。

(4) 寻址速度快。数据检索采用声光或电光等非机械寻址方式,因而系统的寻址速度很快,寻址一个页面的时间可小于 $50 \mu\text{s}$ 。数据访问时间可降至亚毫秒范围或更低。

(5) 有关联寻址功能。块状角度复用体全息存储用角度多重法存储多个全息图,读出时用物光中的某幅图像光波(或其部分)照射其公共体积,则会读出一系列不同方向的参考光,各光的强度大小代表对应存储图像与输入图像之间相似程度。利用此关联特性,可实现内容关联寻址操作和基于图像相关运算的快速目标识别。

8.4 超高密度光电存储技术

随着计算机技术,特别是多媒体技术的发展,需要处理和存储的数据量大幅度增加。例如,一部通常长度的电影没有压缩的数据量将超过 10 TB。大型探测器,如哈勃望远镜所传回的数据量达到 10 TB/天;医学及大地遥感图数据量巨大。显然现在基于二维方式的光存储器已难于满足这种日益增长的要求了。现行的 CD、磁光和相变光盘的容量在 650 MB 左右,即使新兴的 DVD 光盘,单面单层的 DVD-5 的容量也只达到 4.7 GB。虽然,现可使用波长为 $0.41 \mu\text{m}$ (蓝光)的 GaN 半导体激光器,即 HD-DVD 光盘,其存储容量可达 27 GB,是高密度数字多功

能光盘,但还不能满足信息时代发展的需要。因此,必须研发新的超高密度光电存储系统。除全息存储以外,短期有实用前景的超高密度光电存储技术,主要有双光子双稳态三维数字存储、近场光学存储、电子俘获存储、光谱烧孔存储等新技术。

8.4.1 双光子双稳态三维存储技术

1. 三维存储的概念

由于光相互之间不会被屏蔽,所以光存储较之磁存储更为容易实现三维存储。传统的光存储是存储在光盘或全息膜等二维存储介质上,而三维存储则是像一摞二维光存储介质,故存储容量很大。从理论上说,在三维存储中,一个记录点可存储于 λ^3 的体积内,也就是说,对于一个体积为 V 的存储体来说,如使用的存储波长为 λ ,则其存储量可达到 V/λ^3 。如选用波长为CD中使用的780 nm时,一个 1 cm^3 的存储体可存储 2×10^{12} 位,即 $2.5\times 10^{11}\text{ B}$ 。相当于300张CD-ROM盘的存储量。因此,三维存储可在不改变激光波长的情况下,极大地提高存储密度。由于其密度与波长的三次方成反比,因此缩短波长在三维存储中会获得比二维更大的容量。

三维存储是指利用双波长、多波长、多偏振态光波和光波干涉等方法在存储体上实现体存储的方法。三维存储主要包括页面存储、多层存储、多色存储和全息存储等几个方面。如8.3节所述的全息存储,其最小记录斑点是 $\lambda\times\lambda$,在立体全息存储中,存储量扩大了 d/λ 倍,存储密度仍为 V/λ^3 。因此,在三维存储中,不管是逐点记录还是全息记录方式,其记录密度均为 $1/\lambda^3$ 。

2. 双光子吸收的光致色变三维存储

具有双光子吸收的光致变材料的发现,为逐点三维存储提供了实现的可能。利用光子作用下发生的化学变化实现信息存储,是一种光子吸收的存储技术,它的反应时间极短(皮秒或飞秒),能够实现高速存储。此外,由于这种反应建立在分子尺度上,因此理论上可将单个信息符尺度缩小到分子量级,从而有利于大幅度提高介质的存储密度,实现高密度存储。由于其反应时间短和分子量级上的尺度,突破了传统热效应存储在时间和空间上的极限。

(1) 双光子吸收的光致色变材料的光学双稳态效应。许多光致变色材料,如螺吡喃、螺恶嗪、俘精酸酐及二芳基环烯分子等,具有相对稳定的光学双稳态效应,每一种状态对一特定波长的光线有明显的吸收。在一定条件下,以该状态吸收波长的激光照射,可使之激发至另一稳定状态,而且该过程是可逆的。光学双稳态记录即是根据这一光化学现象,以这两种稳定状态来表示数字0和1,从而实现数字式数据存储。读出时,用两种波长之一的激光以较小功率照射,通过检测反射率变化或荧光效应即可辨别读出点处的记录介质处于何种稳定状态,从而读出记录信息。

任何一个光子都可以穿透介质而不被吸收,只有当两个光子聚焦于一点,能量叠加才会导致光致变色反应发生,从而实现光信息记录。同时为了能有效地读出相应的信息,材料还需具有荧光特性,它需要三种不同波长的激光。写入与上述类似,也是使用短波长激光(如355 nm+590 nm)使介质发生光化学反应,分子从状态0变成状态1。读出时使用较长波长(如590 nm)的激光,处于状态1的分子在该波长激光照射下会发出荧光,而处于状态0的分子则不会,因此通过检测读出光照射下介质的荧光效应,就可以区分所写入的信号。对于发荧光材料而言,只要提高分子的荧光量子产率,就可以避免分子在读出光照射下发生状态变化,因此



这是一种无损读出过程。擦除时由于需要更高的能量,因此需要用两束光同时照射(如 1 064 nm+590 nm)。

由于一定光致色变材料对一定波长的光线有吸引并反应,而对其他波长的光线不敏感。因此,若记录层含有吸收带不同的多种或多层光致色变材料,则可用相应的多种波长分别写入和读出,从而实现多波长的多重记录。所以,通过多重多维记录,在不改变光斑尺寸的情况下,能进一步提高单盘存储容量。

(2) 光致色变存储的优缺点。光致色变存储化合物作为光存储介质有如下优点。

- 灵敏度高、速度快,可达纳米量级。
- 可用旋转涂布法制作光盘,制作成本低。
- 信噪比高、抗磁性好。

光学性能可通过改变分子结构来调整,有利于有机合成等。

但是,光致色变的实用化,还需解决与半导体激光器波长相适应、热稳定性、写擦疲劳等问题。

3. 双光子吸收光学存储的形式

实际上,任何光性质的不同,都可用做信息的光记录和读出,所以双光子吸收光学存储有很多形式。

- 光致色变存储。
- 光敏聚合物存储。
- 光致荧光漂白存储。
- 光折变效应存储等。

4. 双光子双稳态三维数字存储的原理

双光子双稳态三维数字存储的基本原理是,根据两个不同光束中的光子同时作用于原子时,能使介质的原子中某一特定能级上的电子激发至高的电子能态即另一稳态,并使其光学性能发生变化。因此,若使两个光束从两个方向聚焦至材料的同一空间点时,便可实现三维空间的寻址、写入与读出。由于光信号的写入与读出属于原子对光量子的吸收过程,除反应速度快外,其最小记录单元的尺寸在理论上可达到原子级。这种方法能实现 Tb/cm³ 量级的体密度、40 Mb/s 的传输速率。

5. 双光子存储技术的特点

双光子存储技术有以下特点。

(1) 在双光束记录结构中,对各光束的峰值功率要求不太高,而单光束记录结构中,对光束的峰值功率要求很高,必须采用飞秒级锁模脉冲激光器。

(2) 存储体的形状可采用立方体或多层盘片结构,以提高存储容量。

(3) 记录信息的读取,普遍采用“共焦显微”系统及 CCD 摄像头。

(4) 对于光色变材料的记录信息可采用双光子读出或单光子读出方案。

(5) 在光色变存储方案中,掺杂 AF240 (2%) 光色变分子(有机聚合物)的存储密度可达到 100 GB/cm³ 以上。

8.4.2 电子捕获存储技术

1. 电子捕获存储技术的基本概念

电子捕获存储技术的原理是电子的俘获和释放,其信息的记录和读取的过程只与电子的俘获和释放有关,而和光学材料的状态及结构变化无关,因此,可以以纳秒时间实现写入和读出,反应时间很快;无热效应;可反复擦除、使用寿命非常长等。

一种适用于未来大容量计算系统的理想存储器必须同时具有高存储密度、高存取速率和长寿命三个特点。电子捕获存储方式具有这些特点,它是通过低能量激光去捕获光盘特定斑点处的电子来实现存储的,是一种高度局域化的光电子过程。从理论上讲,它的写、读、擦不受介质物理性能退化的影响。最新开发的电子捕获材料的写、读、擦次数已达 10^8 以上,且写、读、擦的速率快至纳秒量级。因此,借助于电子捕获材料的固有特性,可以使激光存储密度远远高于其他类型的光存储介质。

2. 电子捕获存储技术的工作原理

电子捕获激光存储的具体过程是:当一束激光(其光子能量在电子跃迁能量范围内)照射到电子捕获材料上时,材料中的基态电子被激发到高能级 E 后下落,并被低能级 T 处的陷阱捕获,形成被电子填充了的陷阱,它代表二进制信息位 1。写入光束中断后,此状态仍能保持,从而实现了数字光信号的存储;信息的读出是以陷阱对电子的释放为基础的,在一束近红外光(其波长对应于足以使被捕获电子逃逸出陷阱并跃入能级 E 之中的光子能量)照射下,光斑局域位置的被捕获电子,在获得光子能量后跃迁到能带 E 中,并与另一种稀土原子作用后,返回到基态 G,同时发射出与跃迁过程损失的能量相对应波长的光子,探测到这种光,就能证实存储单元局域位置处的陷阱被电子所填充(存在二进制信息位 1)。所以,多次读出(或选用适当的功率光一次读出)会使被捕获电子基本耗尽,这就对应于信息的擦除。

实际测量表明,电子捕获激光存储技术可实现对模拟或多电平数据的存储,利用这种技术并采用多电平信号鉴别和相关码,可使传统光盘的每面存储容量增加至 1.5 GB。若进一步将不同光谱响应度的电子捕获材料薄膜层堆叠起来,则能实现三维光存储。

3. 电子捕获存储技术的优点

- 对表面缺陷及形貌扰动不敏感。
- 可反复擦除、写/擦循环次数不受限。
- 存取速度很快,以纳秒时间实现写入和读出。
- 无热效应。
- 使用寿命非常长等。

总之,电子捕获存储是一种相当有前途的光存储技术。

8.4.3 持续光谱烧孔存储技术

1. 光谱烧孔存储技术的基本概念

光谱烧孔存储技术是利用分子对不同频率光吸收率不同来识别不同的分子,可以实现用一个分子来存储一位信息,从而达到超高密度存储的目的。



由于可以通过改变激光频率在吸收谱线内烧出多个孔,即利用频率维来记录信息,从而在一个光斑内存储多个信息,其存储密度可提高2~3个数量级。

光盘存储通常称为位置选择光存储,三维全息存储称为角度和波长选择光存储,由于衍射限制它们的存储密度所能达到的极限是 $1/\lambda^3$ 数量级或 10^{12}cm^3 左右,相应的1比特信息所占据的空间含有 $10^6\sim 10^7$ 个分子。如果能用1个分子存储1位信息,存储密度便能在目前光存储的基础上提高 $10^6\sim 10^7$ 倍,但相应地要求有适当选择或识别分子的方法。

2. 持续光谱烧孔存储技术的基本原理

持续光谱烧孔(Persistent Spectral Hole-Burning, PSHB)技术利用不同频率光的吸收率不同来识别不同分子,它有可能使光存储的记录密度提高3~4个数量级,它属于四维光存储。

用频率为 ν_0 且线宽很窄的强激光(烧孔激光)激发非均匀加宽谱线的工作物质,同时用另一束窄带可调谐激光扫描该物质的非均匀加宽的吸收谱线,则在吸收频带上激发光频率 ν_0 处会出现一个凹陷,这就是光谱烧孔,如图8-15所示。

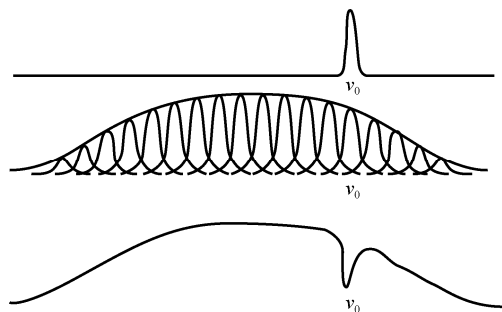


图 8-15 光谱烧孔的原理示意图

PSHB 光存储器是把烧孔激光调谐到荧光吸收谱带内的不同频率位置,孔就出现在不同的频率上,于是以有孔和无孔分别表示信息1和0两个状态。用测量透射光强的方法可以检测孔的有无。但这种孔是瞬时的,可用强激光激发与之共振的离子,发生光化学或光物理变化,从而使孔能保存较长的时间,这样就实现了光信息的存储。这就是 PSHB 存储技术的基本原理。

光谱烧孔方法有可能突破光存储密度的衍射限制,因为光谱烧孔除了利用记录材料的空间自由度以外,还可利用光频率自由度。在光斑平面位置不变的情况下,调谐激光频率在吸收谱带内烧出多个孔,可实现在一个光斑位置上存储多个信息。

3. 光谱烧孔的全息存储

除了 PSHB 存储信息外,还实现了光谱烧孔的全息存储,全息图的记录是通过不同子集分子的光学特性来实现的。Lachru 和 Shen 等人使用掺稀土的烧孔材料,在数据输入/输出速率方面取得了突破性的进展,实现了以30 Hz的帧速(视频速率)随机读取500幅全息图(每幅含有 512×488 个像素)。这种存储方法基于平面全息图的存储,如果将 PSHB 技术与体全息技术相结合,其应用前景将不可限量。

8.4.4 近场光学存储技术

1. 近场光学存储的基本概念

目前各种光盘驱动器均用光学镜头进行读或写,其物镜离介质为 mm 量级,属于远场光学存储系统。虽然可通过短波长光激光器和固体浸没透镜等技术能使光盘记录密度有一定的提高。但物镜聚焦的光斑尺寸受远场衍射极限的制约,不可能从根本上实现光学存储的超高密度。而在近场光学显微镜中,近场的小孔功能由光学探针的针尖来完成,光学探针尖端孔径远小于光的波长。当把这样的纳米小孔置于距样品表面一个波长以内(即近场区域时),不仅可以探测到由物体衍射的传导分量,而且可探测到非辐射场-隐失场分量(对应于高的空间频率,包括丰富的纳米光学信息)。因此,采用近场光学原理设计超分辨率的光学系统,使数值孔径超过 1.0,相当于探测器进入介质的辐射场,从而能够得到超精细结构信息,突破衍射极限,获得更高的分辨率,可使经典光学显微镜的分辨率提高两个数量级,面密度提高 4 个数量级。

2. 近场光学存储的基本原理

近场光学存储的基本原理是,通过纳米尺寸的光学头和纳米尺寸的距离控制,实现纳米尺寸的光点记录,所以克服了衍射极限而提高了光存储的密度。就提高光学存储密度来说,近场光学的超衍射分辨方法是最基本的方法。

3. 近场光学存储的优点

与其他高密度存储方法相比,这种存储方法具有两大优点。

(1) 密度高、容量大。由于其读写光斑小,可大大提高存储密度和存储容量,并且存储每兆数据的花费,比普通光盘大大降低。如果采用多光束多光点并行的方法,其数据传输率还可进一步地提高。

(2) 可充分运用已有的存储中的成熟技术,以减少开发的时间和投资。这种近场光学存储方法,可以利用其他存储技术已经成熟的相关技术,如硬盘驱动器中的磁头悬浮技术和光盘存储中的光头飞行技术,因而不需另外去进行新的系统设计和开发。显然,这对降低产品的价格起了很大的作用。

8.4.5 超高密度光电存储技术的发展趋势

1. 高密度光存储技术的研究重点

各种光存储技术,都是以提高存储容量、密度、可靠性和数据传输速率为主要发展目标。从整个学科发展的角度预测,高密度光存储技术的发展将着重于对以下几个方面的研究。

(1) 最基本、有效的数字式记录方式。

(2) 进一步缩小记录单位。近场超分辨存储是发展高密度光存储的一个典型尝试。随着精密技术及弱信号处理等相关技术的进一步,光信息的记录单元将从目前的分子团逐渐减小到单分子或原子量级。



(3) 从目前的二维存储向多维存储发展。多维包括两方面的含义：一是指记录单元的空间自由度，平面存储拓展到三维体存储，以及基于持续光谱烧孔效应的四维光存储；二是指复用维数的多维，用全息波长或角度选择性，来增加实际存储的复用维数。

(4) 并行读写逐步代替串行读写，以提高数据的读取速率。并行读写功能是体全息页面存储的一个固有特性，是体全息存储被普遍重视的原因之一。

(5) 改善和发展存储系统的寻址方法，努力实现无机械寻址的实用化，从根本上解决目前难以提高随机寻址速度的问题。

(6) 光学信息存储同光学信息处理相结合，以提高信息系统整体性能及功能，充分利用光学特性实现信息存储、传输、处理和计算的集成。

2. 光电存储技术的发展趋势

上述新型的光电存储技术可以实现存储密度达 $1/\lambda^3$ ，或者其记录材料的微观结构的分辨率，所以能够实现真正意义上的海量存储。目前，光电存储技术的发展趋势如下。

- 从远场光存储到近场光存储。
- 从二维光存储到多维光存储。
- 从光热存储到光子存储。
- 从有运动部件存储设备到无运动部件存储设备等。

超高密度光电存储技术是一种代表着信息存储发展方向的新技术，它在新世纪的信息光子时代将会发挥巨大的威力。与国外的发展态势相比，必须加快我国超高密度光存储技术的研究和发展，使它在促进我国信息科学与产业的发展中起到关键的作用。

8.5 光电信息存储技术在安防中的应用

虽然，目前安防视频监控系统的录像存储设备还广泛地应用着磁盘存储系统，但光盘等存储设备有比磁存储读/写和擦除是非接触式的，寿命长，存储密度高，容量大，信息位价格低，不受电磁干扰等优势，只要尽快使其可擦除系统大量市场化，并降低价格，终将会代替磁盘存储而广泛应用于安防监控系统中。

8.5.1 光盘存储技术在安防中的应用

由 8.1.1 节可知，第三代光盘存储已经兴起，使用 GaN 半导体激光器，波长为 $0.41\mu\text{m}$ （蓝光），存储容量可达 27 GB，为高密度数字多功能光盘，即 HD-DVD 光盘（蓝碟）。20 世纪 80 年代后期出现的磁光盘（MOD）技术和 20 世纪 90 年代初期出现的相变光盘（PCD）技术也得到了飞快发展，并且已经进入实用。这些新型光盘均可应用于安防视频监控系统的录像存储设备中。

例如，图 8-5 所示的可擦除式磁光盘录像机，就已用于安防视频监控系统的录像存储设备。由图 8-5 可见，它的操作方式与硬磁盘完全相同，但其容量比一般硬磁盘就要大得多，并且改写这种光盘数据的方法也非常简单，利用激光束将光盘上的某个点加热到磁记录材料的居里温度，并施加特定方向的磁场，其磁记录单元的磁性就可以改变，这样就修改了数据。

要读取光盘上数据时，需先用低功率的激光束照射光盘表面，再通过读取记录单元反射的

光束来探知该单元的极性。一般,每个单元可以记录一个比特的信息:0或1。磁光盘记录的图像都有各自的编号,采用随机访问的方法,可很容易地读出所需的图像,而查找和读取图像只需要不到1s的时间。一般,普通光盘的容量约为800MB,它可存储1万幅未压缩的彩色画面。1张5.25英寸光盘的存储量等同于31卷数据磁带。

由于它们与硬磁盘相比,具有可随意更换、非接触读写、信息信噪比高、每位信息价格比低等优点,其每片容量及存储密度也很大。因此,可擦写光盘从一问世即呈供不应求之势,世界各大公司都投入巨资大量生产。日本佳能公司的130mm磁光盘驱动器已被选为美国Next计算机的主存储器,而温盘驱动器仅作为任选附件。为实现1GB的主内存的计算机,其外存容量要求4.5~10GB的大容量。这为目前90mm光盘的40~100倍、130mm光盘的8~20倍。

此外,PD是松下公司采用相变光方式(Phase Change)存储的可重复擦写存储设备,是一种比CD-RW性能更好、运行更稳定的光盘介质驱动器。PD驱动器的运行速度较低,可以兼容CD-ROM。使用专门PD光盘,可重复擦写大约50万次。PD的平均寻址时间为89ms,数据传输率为518~1141KB/s,相当于八倍速光驱,写入并校验时的数据传输率为300~600KB/s,相当于四倍速光驱。除了可以读写PD光盘外,也可以当成普通的八倍速CD-ROM使用。

由上述可知,光盘存储设备必将取代磁盘而广泛应用于安防视频监控系统的录像存储设备中。

8.5.2 大容量光带存储技术在安防中的应用

随着多频道多媒体时代的来到,要求图像素材的有效应用日益提高,因此需要一种可以代替过去录像带的在小盒内可长期保存,并可多次再生的大容量记录存储媒体。这种大容量记录存储媒体,不光是电视领域需要,在计算机和通信领域,随着静止图像和动态图像等信息量多的数据自由处理,也期待出现一种在光盘和磁盘中不能实现的大容量、高可靠性的记录存储媒体。而光带录像机就能满足这一要求。

这种大容量光带存储系统,可以实现磁盘、光盘、磁带等不能实现的高可靠、大容量记录。这在多媒体时代的需要是很大的,因而也适用于安防视频监控系统作为长期保存的录像存储设备中。

8.5.3 全息等新兴存储技术在安防中的应用

目前,超高密度的光全息等新兴存储技术仍然处于研究之中,它们的实用化与市场商品化还有一定难度。例如,光全息存储技术最突出的是当一个记录点被照亮时,此点上所有的记录图像都显现出来。为了读取正确的信息就需要选择好方向,且消除相互之间的干扰和噪声。因此,噪声处理等问题,尚需进一步研究解决。下面介绍已研制出的两种全息存储设备,可望将来应用于安防视频监控系统的录像存储设备中。

1. 数字数据的全息存储模块

1997年,一个由Drolet等人设计出来的集成化的角度复用全息存储模块,如图8-16所示,由图可见,该模块包括一个BaTiO₃光折变晶体、一对液晶光束偏转器(图中只能见到一个,



另一个在晶体后面)和光电子集成电路 OEIC (包括光电子 SLM、探测器、刷新器等)。

该模块的优点是:采用共轭读出方式,再现光逆向经过信号光束记录时所通过的路径(从 SLM 到记录介质),不需要额外的再现光路和成像光路;其共轭读出方式,还校正了读出光的线性相位畸变。其中,OEIC 的每个像素都具有存储、光探测和调制功能,它本身可完成像素之间的局部数据传输(如探测器到存储器、存储器到调制器),并具有动态刷新的功能。

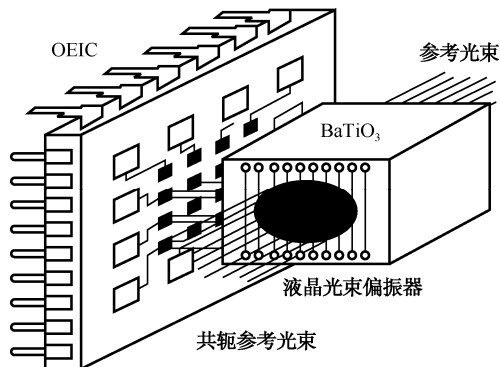


图 8-16 紧凑型集成化的角度复用全息存储模块

2. 超大容量全息存储器

利用体全息材料,还可进一步研究超大容量的全息存储技术,目前已经发展了几种盘式全息存储方案,如三维盘式全息存储方案就是实现超大容量存储的一种途径。基于全息存储技术的分块盘式全息存储示意图,如图 8-17 所示,图中,沿盘面上的同心圆轨道上,划分为互不重叠的空间位置(全息块),每个位置上复用存储大量全息图,可以是角度复用、波分复用或相位复用。

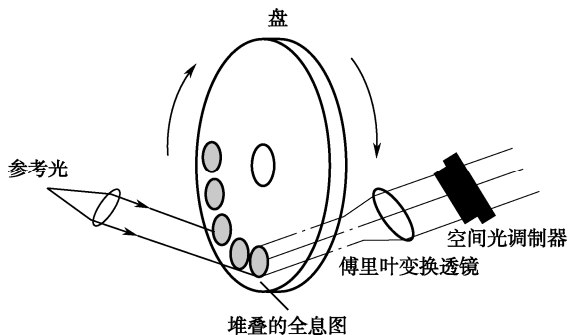


图 8-17 分块式全息存储盘的示意图

研究发现,角度复用和波长复用可以存储的全息图总数大致相同,但波长复用有着更高的面密度。全息盘潜在的高数据传输率不是依靠盘面转速的提高,而是通过整页并行读出实现的,这也将缓解系统对高速机械运动的要求。

显然,由于全息存储等新兴超高密度存储技术的密度高,只要其产品实用化后,未来必将会应用于安防视频监控系统的录像存储设备中。

光电信息显示技术及其 在安防中的应用

众所周知，显示器是各种视频信息和计算机数据信息的终端显示器件，因而显示技术是信息技术领域的支柱之一，它的发展水平反映一个国家在世界信息技术领域的战略地位。在现代信息社会内，几乎所有人的工作和生活都离不开信息显示技术。信息显示器（如LCD、LED屏、投影仪等）是科学研究和工业应用的基本工具，而电视显示屏也是千家万户老百姓获取信息的主要来源。信息显示技术已形成数以千亿美元计的技术产业链，产生了巨大的经济效益。

随着科学技术的飞速发展，不断出现各种各具特色的新型显示器件，其种类已呈多元化。所有显示器件都在发展中不断扬长避短，不断完善自己，优点和缺点也在不断转化。实际上，这种多元化显示方式的竞争，正好有利于显示技术的创新。

显示技术经历了由黑白显示到彩色显示，由普通彩显到高清晰度彩显的过程，目前平面显示技术已经取得了很大的成就。虽然，CRT显示技术长期以来一直占据着监视器（或显示器）市场的主流，但其体积大、面板厚、消耗功率大等，一直不为人们所接受。随着光电信息技术、材料科学及其相关技术的发展，就已出现LCD、PDP、LED、OLED、QLED等显示器。目前，LCD显示技术已基本取代了CRT显示技术。虽然，LCD显示技术具有工作电压低、功耗小，没有丝毫辐射、对人体健康无损害，完全平面、又薄又轻，显示字符锐利、画面稳定无闪烁、环保护眼，精确还原图像，无失真，屏幕边沿图像清晰度与屏幕中心相同，屏幕调节方便，寿命长，抗干扰能力强等优点，但它又有被动发光显示（靠背光源）、亮度和对比度低，可视角度小，响应速度慢，出现坏点无法维修等缺陷。因此，它也将被近期出现的OLED、QLED显示技术取代。

凡是搞光电信息技术的人都知道，人类可通过视觉获得周围世界80%的信息，而随着生活水平的提高和科技的发展进步，人类需要越来越多丰富的视觉信息。而显示技术，就是为了给人类提供不同形式的视觉信息而存在的。

我们生活在三维物理世界中，所有物体都具有三维（长、宽、高）物理尺寸，然而，迄今为止所有商业化信息显示器都只能显示二维图像和文字，人们无法从被显示的图像上获得物体的三维信息或感受到物体的物理深度。这种目前仍在使用的二维显示技术剥夺了物体的第三特征，具有极大的局限性。有鉴于此，近年来提出并开展了一系列真三维高清晰度显示的关键技术和产业化方法的研究。这种真三维显示技术从根本上更新了二维信息显示的概念，对信息显示技术的发展具有颠覆性影响。这项技术使被显示物体的三维图像栩栩如生，向观看者提供



了完备的心理和生理的三维感知信息，为理解三维图像和其中物体之间的空间关系提供了独特的手段，因而具有极高的科学、社会和商业价值。

目前已商业化的显示技术，只能在平面显示器(x,y)上实现对三维世界的表达，在真实感上，离用眼睛直接去观看客观事物仍有很大差异。诚然，平面显示在某种程度上给人三维的立体感觉，但只是在二维显示技术基础上基于心理的认知，从本质上讲，不能算是真正物理意义上的三维立体显示。现有的大部分立体显示技术，在显示的视角上大多达不到广角要求，因为它们脱胎于二维显示，始终没有摆脱传统的二维显示屏幕 180° 显示空间的限制。此外，还要借助立体视镜，或者要借助平面显示屏上的“视差”效果。

根据目前光电信息显示技术的发展情况及市场的需要，我们将光电信息显示技术分为平板显示技术、投影显示技术及三维立体显示技术三类予以介绍，最后介绍它们的发展趋势及其在安防中的应用。

9.1 平板显示技术

平板显示技术有液晶 (LCD)、等离子体 (PDP)、发光二极管 (LED)、有机发光二极管 (OLED)、量子点发光二极管 (QLED) 显示技术，下面分别给予简单介绍。

9.1.1 液晶 (LCD) 显示技术

液晶 (Liquid Crystal) 是一种介于固态和液态之间的物质，是具有规则性分子排列的有机化合物。液晶按照分子结构排列的不同分为三种：类似粘土状的 Smectic 液晶、类似细火柴棒的 Nematic 液晶、类似胆固醇状的 Cholestic 液晶。用于液晶显示器的是第二类的 Nematic 液晶，采用此类液晶制造的液晶显示器被称为 LCD (Liquid Crystal Display)。

1. LCD 的基本结构及工作原理

LCD 器件的结构如图 9-1 所示。由于液晶的四壁效应，在定向膜的作用下，液晶分子在正、背玻璃电极上呈水平排列，但排列方向互为正交，而玻璃间的分子呈连续扭转过渡，这样的构造能使液晶对光产生旋光作用，使光的偏振方向旋转 90° 。

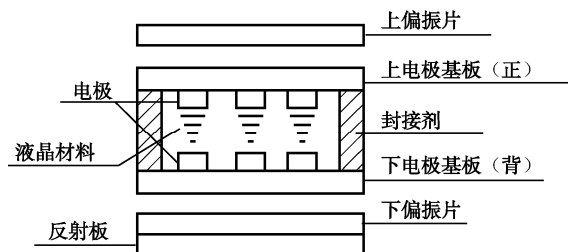


图 9-1 LCD 的基本构造

图 9-2 所示为液晶显示器的工作过程。当外部光线通过上偏振片后形成偏振光，其偏振方向成垂直方向。这种偏振光通过液晶材料之后，被旋转 90° ，使偏振方向成水平方向，此方向与下偏振片的偏振方向正好一致，因此此光线能完全穿过下偏振片而到达反射板，经反射后能

沿原路返回,从而呈现出透明状态。如果在液晶盒的上、下电极加上一定的电压,则电极部分的液晶分子转成垂直排列,从而失去旋光性。因此,从上偏振片入射的偏振光不被旋转,这种偏振光到达下偏振片时,其偏振方向与下偏振片的偏振方向垂直,从而被下偏振片吸收,而无法到达反射板形成反射,所以呈现出黑色。由此,我们可根据需要将电极做成各种文字、数字或点阵,就可获得所需的各种显示。

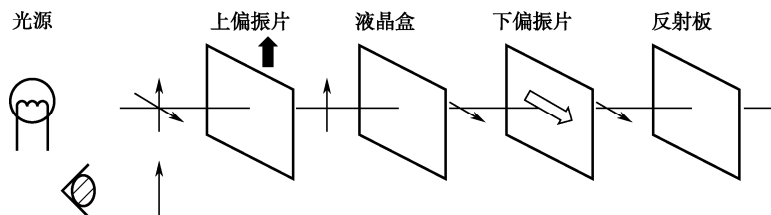


图 9-2 液晶显示工作原理

LCD 是基于液晶电光效应的显示器件,它包括段显示方式的字符段显示器件;矩阵显示方式的字符、图形、图像显示器件;矩阵显示方式的大屏幕液晶投影电视液晶屏等。液晶显示器的原理是利用液晶的物理特性,在通电时导通,使液晶排列变得有秩序,从而使光线容易通过;不通电时,排列则变得混乱,而阻止光线通过。LCD 就是利用此原理制成的。

2. 液晶显示器的类型及比较

(1) 液晶显示器的分类。

① 按使用范围分为两种。

- 笔记本电脑液晶显示器。它是目前我国最为常见的液晶显示器产品,它与笔记本电脑的其他部分连为一体,以其轻便和小巧给使用者带来了方便。
- 桌面计算机液晶显示器。它是 CRT 传统显示器的替代产品。

② 按物理结构分为四种。

- 扭曲向列型 (Twisted Nematic, TN)。
- 超扭曲向列型 (Super TN, STN)。
- 双层超扭曲向列型 (Dual Scan Tortuosity Nomograph, DSTN)。
- 薄膜晶体管型 (Thin Film Transistor, TFT)。

前三种类型在名称上只有细微的差别,说明它们的显示原理具有许多共性,不同之处是液晶分子的扭曲角度各异。其中, DSTN 可以算是这三种的“杰出”代表,由这种液晶体所构成的液晶显示器对比度和亮度仍比较差、可视角度较小、色彩也欠丰富,而它的结构简单、价格低廉,因此还占有着一定的市场。第四种 TFT 是现在最为常用的类型。

(2) 几种液晶显示器的比较。TN、STN、TFT 三种类型液晶显示器的比较,如表 9-1 所示。

表 9-1 TN、STN 和 TFT 型液晶显示器比较表

类 别	TN	STN	TFT
原理	液晶分子, 扭转 90°	液晶分子, 扭转 $240^\circ \sim 270^\circ$	液晶分子, 扭转 90° 以上
特性	黑白、单色, 低对比 (20:1)	黑白、彩色 (26 万色) 低对比, 较 TN 佳 (40:1)	彩色 (1667 万色) 高对比, 较 STN 佳 (300:1)

续表

类 别	TN	STN	TFT
全色彩化	否	否	可媲美 CRT 的全彩色
动画显示	否	否	可媲美 CRT
视角	狭窄 (30° 以下)	狭窄 (40° 以下)	较宽 (80° 以下)
面板尺寸	1~3 英寸	1~12 英寸	6~17 英寸
应用范围	电子表、计算机、简单的掌上游戏机	电子辞典、移动电话、个人数字助理、股票机、低档笔记本式计算机	彩色笔记本式计算机、墙壁型彩色电视、投影仪、汽车导航系统、监视器

TFT 是指液晶显示器上的每一液晶像素点都由集成在其后的薄膜晶体管来驱动。TFT 液晶显示器具有屏幕反应速度快、对比度好、亮度高、可视角度大、色彩丰富等特点,比其他三种类型更具优势。同时还克服了 DSTN 液晶显示器固有的一些缺点,确实可以算是当前液晶显示器的主流设备,目前已广泛应用于监视器、笔记本电脑、可视门铃、汽车 VCD、可视电话、数码相机、安全监控等产品中。

新型的 TFT 液晶显示器与 TN 型的结构基本上相同,同样采用两夹层间填充液晶分子的设计,只不过把 TN 上部夹层的电极改为 FET 晶体管,而下层改为共同电极。但两者的工作原理还是有一定的差别。在光源设计上,TFT 的显示采用“背透式”照射方式,即假想的光源路径不是像 TN 液晶那样从上至下,而是从下向上,即在液晶的背部设置类似日光灯的光管。光源照射时先通过下偏光板向上透出,并借助液晶分子来传导光线,由于上下夹层的电极改成 FET 电极和共同电极,在 FET 电极导通时,液晶分子的表现如 TN 液晶的排列状态一样会发生改变,它也是通过遮光和透光来达到显示的目的。其不同的是,因 FET 晶体管具有电容效应,能够保持电位状态,先前透光的液晶分子会一直保持这种状态,直到 FET 电极下一次再加电时才改变其排列方式。而 TN 就没有这个特性,液晶分子一旦没有施压,就立即返回原始状态。这就是 TFT 液晶和 TN 液晶显示的最大不同之处,也是 TFT 液晶的优越之处。

3. 大尺寸 TFT 液晶显示屏

大尺寸 TFTLCD 显示屏的每一个像素都是由红、绿、蓝三个基本光点组成,这与 CRT 显示器荧光屏涂红、绿、蓝荧光粉的原理是一样的。每一个颜色光点由若干比特的数字信号控制,其比特数的多少与屏的分辨率有关。数字信号控制的是每色点的发光强度,红、绿、蓝就组成不同的色彩。对于一个 800×600 的屏就有 480 000 个像素。一个 800×600 分辨率的液晶屏的结构,如图 9-3 所示。大尺寸液晶显示屏是由屏、矩阵电路和背光源组成,一般矩阵电路是围在屏的四周,但也有电路在屏的背后,这种屏就不适宜去掉背光源用于投影。屏的后面是散射膜,再后面是反射膜,在散射膜与反射膜之间的上部,是细长的冷阴极荧光管。反射膜的作用是增加光效率,散射膜的作用是使光能均匀透过,使正面观看时整个液晶屏亮度均匀。15 英寸以上的屏用到 2 根、4 根,甚至 6 根冷阴极荧光管(目前,新的液晶显示器的背光源已改为白光 LED 灯)。

如果将液晶屏用于投影,则要将背光源拆掉,并且屏的结构还要合适才行。一般地,日立公司的所有屏结构都适宜做投影,而东芝、夏普、三星、爱普生等公司的屏有的行,有的不行。

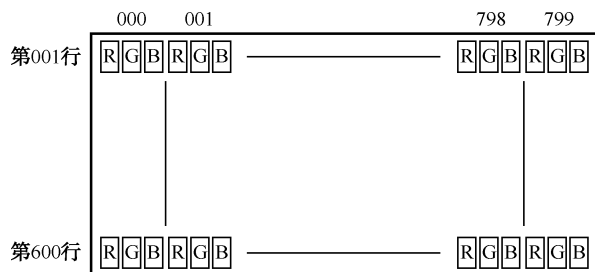


图 9-3 800×600 液晶屏的结构

液晶屏的显示也同传统的 CRT 一样是一行一行和一场一场地扫描，但它是逐行扫描。液晶屏是靠有源矩阵电路来选通一个个像素，所以除了行同步信号和场同步信号外，还需要一个像素时钟，把每一个像素所需要的数字色彩信息施加上去。

液晶屏控制驱动电路就是将模拟的图像信号数字化，选通屏上的对应像素，用数字信号控制像素的亮度和色彩，显示完整和连续的图像。一个液晶屏的像素数是由其物理结构决定的，是固定不变的，这也就决定了液晶屏的最大分辨率。如一个分辨率为 800×600 的屏，可以显示 640×480 的图像，但不能满屏显示，如果要显示 1 024×768 的图像，则只能显示一部分，所以一个液晶屏的最大分辨率也是其最佳分辨率。控制电路的一个重要作用就是对输入的图像信号进行识别，如果不符合液晶屏最佳分辨率的，就要进行再加工，使图像能在最佳分辨率下完整显示。液晶屏控制驱动电路都有微处理器进行控制。图 9-4 所示为液晶屏控制驱动电路内部结构图。

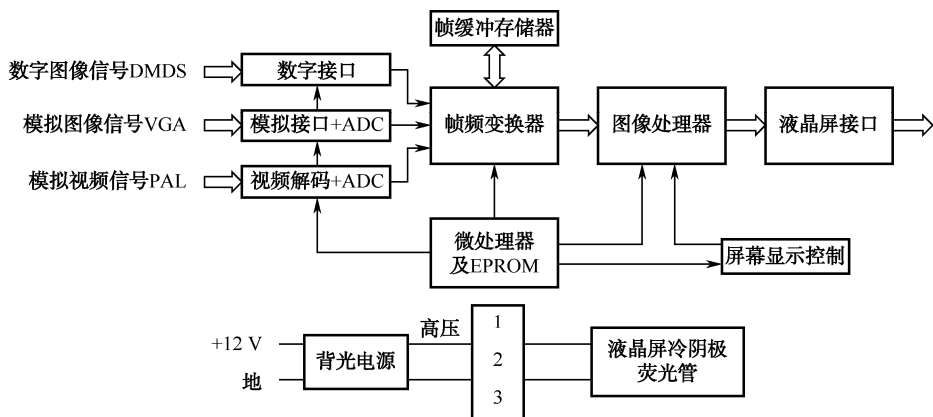


图 9-4 液晶屏控制驱动电路

液晶屏显示发光是靠屏后的一根或两根冷阴极荧光管作光源，通过散射膜使光均匀照射在屏的背后。冷阴极荧光管需要背光电源点亮，背光电源实际上就是一个小型逆变器，它产生荧光管所需要的 1 000 V 左右、30~60 kHz 的高压脉冲。

三星公司推出了新的大型 LCD 显示屏两款：第一款显示器 SyncMaster 403TN 是一款 40 英寸 LCD 监视器，其显示分辨率为 1 280×768，水平和垂直视角分别为 170°，亮度 500 cd/m²，对比度 600:1，具有以太网连接，安装了三星的 MagicNet 软件，该软件允许用户同时控制多台显示器，并由一台计算机向多部显示器提供信号；第二款显示器 SyncMaster 460P 是三星面向商用推出的最大显示器，规格为 46 英寸，其分辨率 1 366×768，对比度 800:1，亮度 500 cd/m²，



响应时间 8 ms。这两款显示器提供多种接口,包括复合视频、S 视频、HDTV 组合视频,以及 PC 的 RGB 模拟和数字接口等。

此外,还可用 LCD 液晶拼接大屏幕墙,这种数字液晶拼接墙是由多个专业液晶屏作为显示单元,以矩阵排列(如 2×2、3×3、4×4 及更大的自由无限拼接)组成的一个大屏幕显示屏,每个子屏幕显示大图像的一部分,共同显示一个大的图像,也可分屏显示不同图像。

大屏幕显示墙由三大部分组成,即拼接显示墙、多屏拼接处理器和信号源,其中多屏拼接处理器是关键技术的核心,支持不同像素的图像在大屏显示墙上显示,以及在大屏显示墙上任意开窗口、窗口放大缩小、跨屏漫游显示。

液晶拼接显示屏,除了拼接数量任意选择外,屏幕组合方式亦有多种选择,可满足不同使用场所的需要。大屏幕拼接画面宏大、视觉冲击强烈,具有很好的展示、演示、广告、宣传的效果,并且安装简便、不受空间限制,广泛应用于视频监控、电信、公共事业、过程处理、交通控制、国防、舞台娱乐、电视演播厅、股票证券、大型会展、商场、银行、办公大厅、公司迎宾屏、专卖店、调度指挥等。

4. 液晶显示器的优缺点

(1) 相对 CRT 显示器来说,液晶显示器具有以下优点。

- ① 工作电压低、功耗小。
- ② 没有丝毫辐射、对人体健康无损害。
- ③ 完全平面、又薄又轻, LCD 同尺寸比纯平 CRT 可视面积大,能做壁挂,从而可适应更多的应用领域。
- ④ 显示字符锐利、画面稳定无闪烁、环保护眼,有利于长时间的使用电脑。
- ⑤ 精确还原图像,无失真,屏幕边沿图像清晰度与屏幕中心相同。
- ⑥ 屏幕调节方便,只需手动调节屏幕的亮度 and 对比度,就可使机器工作在最佳状态。
- ⑦ LCD 屏上光栅位置、倾斜度均不受地磁场影响,抗干扰能力比 CRT 强。
- ⑧ 寿命长,至少可达 5 万小时以上。
- ⑨ 可达到高清晰度电视 200 万像素的显示格式。

(2) LCD 的缺点如下所述。

- ① 需靠背光源发光、亮度和对比度低。
- ② 可视角度小、最长达 140°。
- ③ 对输入信号响应速度偏慢,一般在 40 ms 左右。
- ④ 坏点无法维修。

随着科学技术的不断发展与提高,现在最新的 TFT-LCD 显示器,在克服这些缺点方面已有了相当的进步。当前, LCD 已经成为平板显示领域的主导技术,其产品从直视的超小型头盔显示(Head Mount)到 40 英寸的高清晰度(HDTV) LCD 显示。目前, LCD 显示已基本取代 CRT 而得到更广泛的应用。

由于液晶是一种自身不能发光的物质,需借助背光源才能工作,这一物理特性是无法改变的,因此液晶技术的进化自然需要从背光系统下手。液晶技术的背光系统主要经历了冷阴极荧光灯管(Cold Cathode Fluorescent Lamp, CCFL)和白色发光二极管(White Light Emitting Diode, WLED)两个阶段,目前量子点发光二极管(Quantum Dots Light Emitting Diode, QD-LED 或 QLED)背光极有可能是继 CCFL 背光和 WLED 背光之后,液晶发展史上的最后一次革命。因

此有人称,量子点 QLED 技术,将会把液晶技术进化至完美的终极形态,详情可参见 9.1.5 节。

9.1.2 等离子体 (PDP) 显示技术

等离子是电子、自由离子和中性粒子构成的混合体(宏观上说,它是中性的),由于它的正电荷和负电荷相等,因而称为等离子。等离子体状态是物质存在的基本形态之一,它是固态、液态和气态之外的另一种物质形态,通常称之为物质的第四态。

PDP 是 Plasma Display Panel 的简写,也就是等离子体显示器,是继 LCD 后发展的等离子平面屏幕技术的新一代显示器,它是利用气体放电原理实现的一种发光型平板显示技术,故又称气体放电显示。PDP 的出现,使得中大型尺寸(40~70 英寸)显示器的发展应用产生极大变化,以其超薄体积与质量远小于传统大尺寸 CRT 电视,在高解析度、不受磁场影响、视角广及主动发光等胜于 TFT-LCD 的特点,完全符合多媒体产品轻、薄、短、小的需求,被视为未来大尺寸电视的主流。

1. PDP 的结构、原理与类型

(1) PDP 的结构及显示原理。PDP 主要由等离子显示屏体、屏蔽玻璃、电源、接口电路、信号存储控制驱动电路、XYZ 三极低压驱动电路、外壳构成。信号存储控制是将接口送来的数字图像信号进行子场分离,实现灰度控制。

PDP 采用等离子管作为发光元件,显示屏中有大量等离子管,每一个等离子管对应一个像素。等离子管之间由 100~200 μm 的玻璃基板相隔,四周经气密性封装,形成放电小室,其中充有 Ne-Xe 或 He-Xe 混合惰性气体作为工作媒质,在两块玻璃基板的内侧涂有金属氧化物导电薄膜作为激励电极,当在等离子管电极间加足够的电压后,混合惰性气体会产生等离子体放电(也称为雪崩/电浆效应)。随着放电的进行,电子被加速,加速的电子碰撞 Xe 原子, Xe 被激发至更高能级,形成不稳定的激发态 Xe,这种激发态最终跃迁至 Xe 的基态,产生波长为 147 nm 的真空紫外光。当使用涂有三原色(称为三基色)荧光粉的荧光屏时,紫外线激发荧光屏,荧光屏发出的光则呈红、绿、蓝三原色。当每一原色单元实现 256 级灰度后再进行混色,便实现了彩色图像的显示。

也就是说, PDP 是一种利用气体放电激发荧光粉发光的显示装置,其发光过程由气体的电离放电和荧光粉发光两部分组成(类似于日光灯的发光原理),其原理如图 9-5 所示。

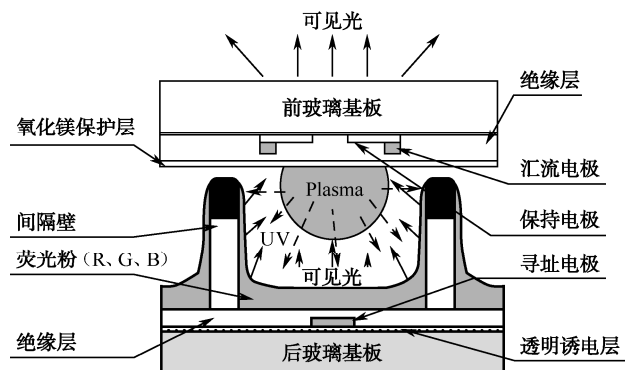


图 9-5 PDP 的结构及原理示意图



显然, PDP 和 LCD 的成像原理截然不同, 液晶是通过一个大的背光灯照亮画面, 而等离子则是每个像素都在发着光。实际上, 等离子屏幕中的每个像素都是由 3 个玻璃气室组成的, 在每个玻璃气室当中都含有惰性气体, 通过大量的玻璃气室组成了一个平板。一个像素的 3 个气室会分别涂有红色、绿色和蓝色荧光粉, 然后通过电极导线在驱动电路的控制下对每个气室放电, 在气室中的惰性气体中放电导致离子体发射出紫外线, 紫外线再激发荧光粉发光, 这就达到了等离子成像。等离子的亮度与导线放电频率有关, 通过驱动电路的控制, 放电频率越快, 亮度就越大。由于是通过高温放电来达到成像, 所以每个气室像素必须有一定间距, 这也就是 PDP 的分辨率无法做得很高的原因。

(2) PDP 的类型。PDP 按其工作方式, 可分为电极与气体直接接触的直流型 PDP 和电极上覆盖介质层的交流型 PDP 两大类。目前研究开发的彩色 PDP 的类型主要有三种: 单基板式(又称为表面放电式)交流 PDP、双基板式(又称为对向放电式)交流 PDP 和脉冲存储直流 PDP 等。

① DC-PDP。放电气体与电极直接接触, 电极外部串联电阻做限流之用, 其发光位于阴极表面, 且是与电压波形一致的连续发光。PDP 按直流驱动式可分为刷新型和自扫描型。

② AC-PDP。放电气体与电极由透明介质层相隔离, 隔离层为串联电容做限流之用, 放电因受该电容的隔直流通交流作用, 需用交变脉冲电压驱动。因此, 无固定的阴极和阳极之分, 其发光位于两电极表面, 且是交替呈脉冲式发光。PDP 按交流驱动式可分为刷新型和存储效应型; AC-PDP 又可分为表面放电式和对向放电式。目前的产品多以交流型为主, 并可按照电极的安排区分为两种结构: 二电极对向放电(Column Discharge)和三电极表面放电(Surface Discharge)。

③ SM-PDP。这种类型是, 以金属荫罩代替传统的绝缘介质障壁。它具有制作工艺简单, 易于实现大批量生产的特点; 并且, 还具有放电电压低、亮度高、响应频率快的优点。

2. 交流 PDP 显示板结构

由于表面放电式 AC-PDP 结构简单、易于制作、放电效率较高, 是目前批量生产和研究开发的主流技术。

交流等离子体显示板结构按颜色显示方式可分为单色和彩色两种: 单色 PDP 板利用 Ne-Ar 彭宁气体在电场作用下放电发橙红色可见光进行单色显示; 彩色 PDP 板利用 Ne-Xe 等彭宁气体在电场作用下放电产生真空紫外光, 来激发涂敷在放电单元内的三基色荧光粉获得红、绿、蓝三基色, 三基色经时间调制和空间混色实现彩色显示。

单色和彩色 PDP 板基本结构是相同的, 所不同的是单色显示由一个放电单元显示一个像素, 而彩色显示由 R、G、B 三个单元显示一个像素。交流等离子体显示板按电极结构的不同可分为对向放电型和表面放电型两种。图 9-6 为表面放电型彩色交流等离子体显示板的基本结构示意图, 其中 9-6(a) 为结构图, 9-6(b) 为放电单元发光示意图, 其中下基板旋转了 90° 。

表面放电型结构有许多种, 图 9-6 为最典型的。大多数制造公司采用的三电极表面放电型 AC-PDP 结构, 现在也有许多在该结构基础上改进的新型结构出现, 如先锋公司的华夫饼式(waffle)结构。由图 9-6(a) 可看到, 在三电极表面放电型 AC-PDP 结构中显示电极(X 电极和 Y 电极)成对地平行制作在前基板上, 电极由透明电极(ITO)和汇流电极组成。对于 107 cm(42 英寸) PDP, 显示电极宽度为 $200\sim 300\ \mu\text{m}$ 。由于透明电极电阻较大, 电极长度可达 1 m, 汇流电极的加入可减少相应的电阻, 从而降低因透明电极电阻压降引起的驱动电压衰减, 使相

应电极所对应的各放电单元电压具有较好的一致性。在显示电极上覆盖透明介质层,该介质层把电极与放电等离子体隔开,起到保护电极的作用。一方面由于它可限制放电电流的无限增长,因此无须制作限电流电阻,使得结构较 DC-PDP 板简单;另一方面,放电时在该介质层表面有壁电荷积累,正是这些壁电荷使得 AC-PDP 板具有存储功能,并降低放电维持电压。介质层厚度通常在 $30\text{ }\mu\text{m}$ 左右,介电常数为 $10\sim 15$ 之间。由于介质材料的抗离子轰击能力差,因此在其表面覆盖一层抗轰击、二次电子发射系数较高的 MgO 保护膜。 MgO 层厚度为 $0.5\sim 1.0\text{ }\mu\text{m}$,这样可延长显示板寿命、增加工作电压的稳定性以及降低着火电压。在实际 PDP 板放电单元中,由于 MgO 的高二次电子发射系数,放电可在 170V 左右维持。寻址电极制作在后基板上,宽度在 $80\text{ }\mu\text{m}$ 左右。寻址电极和显示电极相互正交。在寻址电极上制作条状介质障壁,将相邻放电单元隔开,起到光隔离和电隔离的作用。介质障壁高度通常为 $100\sim 150\text{ }\mu\text{m}$,障壁节距由屏的大小和显示分辨率决定。

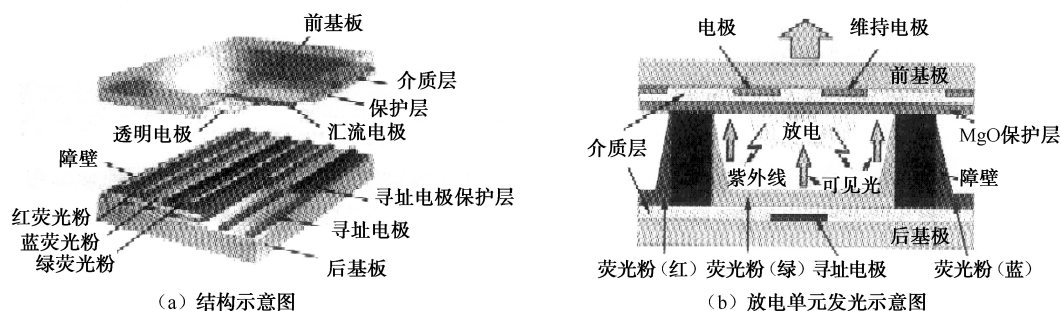


图 9-6 表面放电型彩色交流等离子体显示板的基本结构

3. PDP 显示器的优缺点

(1) PDP 显示器的优点如下。

- ① PDP 厚度小于 12 cm , 可做壁挂薄型大面积显示。
- ② 屏幕不存在聚焦, 图像惰性小, 响应速度快, 更适合 HDTV。
- ③ 可实现全色彩显示, 图像清晰、色彩鲜艳明亮、色纯度极好。
- ④ 屏幕亮度非常均匀, 无图像畸变, 即使边缘也无扭曲失真。
- ⑤ PDP 是自发光, 视角宽 (达 160°), 具有存储功能, 其显示亮度高、对比度高。
- ⑥ 无磁偏转, 不受磁场影响, 绿色环保无辐射, 对人眼无伤害。
- ⑦ 结构整体性好, 抗震与抗电磁干扰能力强, 适合恶劣环境下工作。
- ⑧ 工作于全数字化模式, 有双稳态特性, 便于数字化信号处理。
- ⑨ 可实现 2 000 线以上选址, 有齐全的输入接口, 可接收电脑、VCD、DVD、HDTV 等各种信号源, 因而应用较广。

(2) PDP 显示器的缺点如下。

- ① 功耗大, 发热量大, 需要散热。
- ② 显示屏玻璃极薄, 表面不能承受太大或太小的大气压力, 更不能承受重压。
- ③ 只能大屏, 不能小屏幕。
- ④ 内部气压为 0.5 个大气压, 海拔 2 000 m 以上不能使用。
- ⑤ 制造成本偏高。

⑥ 寿命比 LCD 短。

由上看出,它还有比 LCD 差的,因而还不能取代 LCD。但彩色 PDP 在大屏幕(对角线为 1~1.5 m)显示方面具有明显的优势。目前,PDP 的关键技术已基本突破,彩色 PDP 除用于普通彩电及计算机终端显示外,还推出用于军事指挥中心的显示军用地图、部队部署状况,以及敌我双方作战态势等的彩色显示屏,并且还研制生产了专门用于工业生产过程监控、航天发射状况监控和 HDTV 等的彩色 PDP。彩色 PDP 的发展方向是实现全色、提高发光效率、提高使用寿命、扩展存储容量、降低功耗与成本,并实现大批量生产。

9.1.3 发光二极管(LED)显示技术

随着光电信息技术、微电子技术、自动化技术、计算机技术的迅速发展,半导体制作工艺日趋成熟,发光二极管 LED 作为显示器件的应用范围也日益扩大。

发光二极管点阵阵列显示技术(简称 LED 显示屏技术),由单色到现在的全彩色显示屏,已有了长足的发展,目前,更高亮度、更高耐气候性、更高的发光密度、更高的发光均匀性,可靠性、全色化,仍然是其发展的主要方向。LED 显示屏的关键控制技术随着新型超大规模集成电路(VLSI)的发展也有了新的提高,可编程电子逻辑设备(EPLD),数字信号处理器(DSP)和现场可编程门阵列(FPGA)等得到了应用。通过 VLSI 在产品性能提高的同时成本也在呈下降趋势,新一代 LED 控制专用集成电路也已开始得到推广和应用。经过多年发展,LED 显示屏研制、生产技术已趋于成熟、稳定,新产品质量也有很大提高。

LED 显示器应用非常广泛,在军事、车站、码头、宾馆、体育、新闻、金融、证券、广告及交通运输等许多行业都能见到各种类型的 LED 显示装置,它不仅有条屏、图文单色屏、双基色屏,还有全彩色点阵显示屏及 LED 数码显示屏;不仅能显示文字,还能显示图形、图像,并能产生各种动画效果。一般,单色、双色屏主要用来播放文字;全彩屏主要是播放动画与视频。显然,它是广告宣传、新闻传播的有力工具,其应用已越来越普遍。

1. LED 显示屏的结构与原理

发光二极管显示屏是由 LED 点阵和 LED PC 面板组成的,通过红色、绿色、蓝色 LED 灯的亮灭来显示文字、图片、动画、视频的,其内容可以随时更换,各部分组件都是模块化的结构。

传统 LED 显示屏通常由显示模块、控制系统及电源系统组成。显示模块由 LED 灯组成的点阵构成,负责发光显示;控制系统通过控制相应区域的亮灭,可以让屏幕显示文字、图片、视频等内容,单色、双色屏主要用来播放文字的,全彩屏主要是播放动画与视频的;电源系统负责将输入电压电流转为显示屏需要的电压电流。

LED 显示屏由计算机(或带多媒体卡等)、采集卡、主控箱、数据传输(发送卡、接收卡)、扫描板、显示屏单元组成,如图 9-7 所示。

LED 显示屏的驱动电路及显示系统框图如图 9-8 所示,它是由计数器、译码器、图形译码器和显示屏等组成的。计数器是由多个双稳触发器构成的。译码器是由“与门”组成的,它可将二进制代码转换成十进制数,如果按编码将计数器的输出端同各“与门”输入端相连就可以产生代表十进制的电信号,电信号加到显示屏的各像素点上并显示出相应的图形,这是由图形译码驱动器完成的。图形译码器由一些 LED 组成,各“与门”输出的电信号通过 LED 连接列

在各像素点上。由于 LED 是单向导电, 因而可以保证各像素点不会互相串扰或短接。

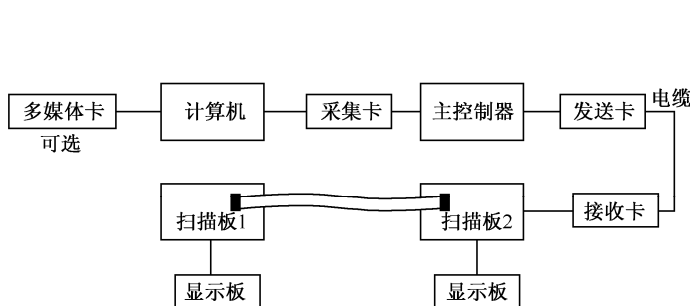


图 9-7 LED 显示屏系统结构

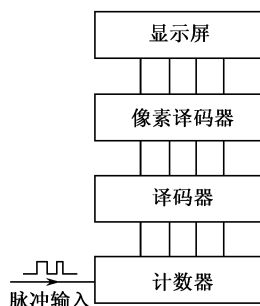


图 9-8 显示屏驱动及显示系统

LED 点阵显示屏的主要原理是, 将要显示的图文信息首先进行数字化处理, 使图文信息转换成相应的数字化视频信号, 经过数字通信系统将数字视频信号传输到 LED 显示屏显示缓存中, 由显示单元控制电路读取相应的显示信息进行显示。由于 LED 显示屏在进行图文显示时, 其显示方式丰富多变, 因此其相应的视频控制模板也十分复杂, 一般分为单色显示和彩色显示两大类。

由于 LED 点阵显示屏具有美观的画面、灵活的内容更换、较低的功耗、较长的寿命等优点, 因而被广泛运用在商场、街道、广场、车站和机场等人群密集或流动量大的场合, 可及时地传播信息和播放电视, 尤其用来播放广告、产品介绍等。

2. LED 显示屏的类型

(1) 从显示方式来分, 可分为静态和动态扫描显示两种。

① 静态显示。LED 的亮度高, 软件编程也比较容易, 但是静态显示每一个像素需要一套驱动电路, 如果显示屏为 $n \times m$ 个像素屏, 则需 $n \times m$ 套驱动电路, 而它又占用比较多的 I/O 口资源, 因而常用于显示位数不多的情况。

② 动态扫描显示。动态扫描显示则采用多路复用技术, 如果是 P 路复用的话, 则每 P 个像素需一套驱动电路, $n \times m$ 个像素仅需 $n \times m / P$ 套驱动电路。对动态扫描显示而言, P 越大驱动电路就越少, 成本也就越低, 其引线也大大减少, 这就更有利于高密度显示屏的制造。并且, 它利用了人眼的视觉暂留效应 (虽看上去在很短的时间周期内 LED 显示屏上的灯全部点亮, 但实际上并没有全亮), 占用资源少, 其动态控制又节省了驱动芯片的成本, 节省了电 (亮度小功率就小了), 因而在实际的 LED 大屏幕显示中采用。但编程比较复杂, 在同样规格同样灯管芯片的情况下, 动态扫描的亮度不如静态的好。

(2) 按颜色分为三种。

① 全彩显示屏。即红、绿、蓝三基色, 256 级灰度的全彩色显示屏, 可以显示 1600 多万种色。

② 单色 (单基色) 显示屏。即单一颜色 (红色, 绿色, 黄色, 白色, 蓝色等)。

③ 双色 (双基色) 显示屏 (红绿色、蓝绿色) 红和绿双基色, 256 级灰度或者 512 级灰度, 可以显示 65 536 种颜色。

(3) 按使用环境可分为三种。

① 室内显示屏: 发光点较小, 一般 $\Phi 3 \text{ mm} \sim \Phi 8 \text{ mm}$, 显示面积一般几至十几平方米。



② 半户外显示屏：像素点大小之于室内和户外显示屏之间，常见于银行、商场或医院等门楣上。

③ 室外显示屏：面积一般几十平方米至几百平方米，亮度高，可在阳光下工作，具有防风、防雨、防水功能。

(4) 按安装方式可分为立柱式 LED 显示屏（单立柱和双立柱）、壁挂式 LED 显示屏、吊装式显示屏、嵌入式显示屏等。

(5) 按用途可分为信息发布屏、交通诱导屏、广告发布屏、车载屏、球场屏、舞台租赁屏和楼梯屏等。

3. LED 大屏幕显示器真彩实现

LED 显示屏的显示单元中，三基色 LED 管芯为核心器件，要想质量好，必须选用高质量的 LED 管芯，对此应严格挑选波长及发光强度一致性好的管子。

与彩色电视机一样，全彩 LED 显示屏是通过红、绿、蓝三种颜色的不同光强实现图像色彩的还原再现的。显然，红、绿、蓝三种颜色的纯正度，直接影响图像色彩再现的视觉效果。而白光的三色配比不是简单的三种颜色的叠加，一般要求：

- 在保证红、绿、蓝光频纯正的前提下，要求红、绿、蓝光强之比必须接近 3 : 6 : 1。
- 因人们视觉对红色的敏感性，要求红色发光源在空间上必须要分散分布。
- 因人们视觉对红、绿、蓝三种颜色光强的不同的非线性曲线响应，要求不同光强的白光对红、绿、蓝要进行类似电视机里的 γ 校正。
- 由于人的视觉对色差的分辨能力有限，因此必须找出图像色彩再现真实性的客观指标。因此，为了再现真实的图像色彩，在 LED 显示屏的配光上还应满足下面一些要求。
- 红、绿、蓝三色的波长应分别在 660 nm、525 nm、470 nm 左右。
- 一般采用 4 管单元配白光为佳，当然多管单元也可，但主要取决于光强。
- 选用 256 级为红、绿、蓝三色的灰度级。
- 采用针对 LED 像素管的非线性校正。

红、绿、蓝三色配光及非线性校正，可以用显示控制系统硬件实现，也可由播放系统软件实现。

国内外的 LED 显示屏朝着真彩（ 2^{24} 种颜色）、高分辨率（ $>4\ 096$ 像素点/ m^2 ）方向发展，现在 $7\ 100$ 像素点/ m^2 分辨率的显示单元已经出现。目前，LED 显示屏的显示单元正向着超亮度、高分辨率、高灰度级方向发展；其显示媒体向着多媒体（静止/动态图文、视频图像、音视频同步）方向发展；系统的运行、操作与维护向着集成化、网络化、智能化方向发展。

TI 公司已推出两款适用于大型彩色显示屏的 16 通道恒流下沉式 LED 驱动器 TLC5940 和 TLC5923，其数据传输速率均为 30 MHz，提供了更高的系统可靠性及更佳动态亮度控制，使大型运动场的记分板、广告显示及视频显示屏等设备具有更高的分辨率。

4. LED 显示屏的优缺点

(1) LED 显示屏的优点如下。

- ① 寿命长，比 LCD 显示屏寿命长 10 倍以上。
- ② 节能与绿色环保。
- ③ 光色纯正、柔和、无眩光，可显示图像和文字，显示性能优越。

④ LED 的功率很低, 发热量小。

⑤ 应用范围广。

(2) LED 显示屏的缺点如下。

① 亮度太高, 存在光污染。

② 不适于近距离观看。

③ LED 显示墙的造价比较昂贵, 在画面的精细度上相比投影机差一些。

由上看出, LED 显示屏在节能环保和显示效能上都优于一些传统的显示设备, 但是 LED 显示屏也有一些自身的缺点, 如存在光污染、造价偏贵、不适于近距离观看等, 所以用户选择 LED 显示屏要考虑最终的使用环境才能扬长避短, 发挥 LED 显示屏的优势。

9.1.4 有机发光二极管 (OLED) 显示技术

大家知道, 显示器不仅应用于计算机, 而且广泛应用于手机、数码相机 (DSC)、数字摄像机 (DVC)、PDA、数字电视接收机及汽车卫星导航系统等领域。但是, 目前还没有一种显示技术可以完全适用于所有的领域, 因而使显示器生产商转向下一代显示产品的研制。其中, 最为突出的就是有机发光二极管 (Organic Light -Emitting Diode, OLED) 显示器。

由于 OLED 具有视角宽、亮度高、响应速度快、温度特性好、可弯曲等优异性能, 而代表着显示技术的发展方向, 因而成为发光技术和平板显示技术研发的重中之重。OLED 的最大突破在于材料的机械韧性和低温制程, 它可在任何轻薄的基板, 如塑胶基板上应用。长远而言, OLED 可发展成为新式可弯曲的柔性的显示器, 因而发展潜力雄厚。

OLED 克服了第一代显示器 CRT 体积大、笨重、功耗大和不便于携带的缺点, 也克服了 LCD 视角小、响应速度慢、在低温下不能使用, 且自身不能发光的不足, 并且 OLED 是放射性器件结构, 可获得比传导性结构 LCD 更好的视觉效果, 因而有着非常诱人的应用前景, 已被公认是可以取代 LCD 的产品, 因而使其成为显示器行业的后起之秀。

1. OLED 的基本结构及其发光原理

OLED 是一种利用有机半导体材料和发光材料, 在电流驱动下发光的新型显示技术, 即是基于有机材料的一种电流型半导体发光器件。一个最简单的 OLED 可以由阴极、发射层和阳极组成, 称为单层夹心式有机薄膜电致发光 (EL) 器件。一般制作过程是在导电玻璃基质 ITO 上 (阳极) 旋涂、浸涂或真空蒸镀一层发光材料 (发光层), 然后再镀上阴极材料, 连接直流电源即构成电致发光器件。OLED 去除了 LCD 生产中复杂的电池及液晶显示模块工艺, 同时也无须背光源及滤波器。显然, 生产过程相对简单, 因此 OLED 比 LCD 更具有成本优势。

为了提高有机发光器件的稳定性和效率, 应使电子和空穴载流子的注入达到平衡, 这就要求电极材料的功函数与发光材料的能级相匹配。在电极材料的选择上, 阴极和阳极的要求是不一样的。阴极需采用低功函数材料, 以便电子可以在较低激发电压下注入到发光层内; 而阳极则必须选择高功函数的材料。在上述单层器件的基础上, 已开发出双层和三层结构的有机薄膜 EL 器件。这种双层和三层结构的有机薄膜电致发光器件结构如图 9-9 所示。

当电极上加有电压时, 发光层就产生光辐射。和无机薄膜电致发光器件不同, 有机材料的电致发光属于注入式的复合发光, 其发光机理是由正极和负极产生的空穴和电子在发光材料中复合成激子, 激子的能量转移到发光分子, 使发光分子中的电子被激发到激发态, 而激发态是

一个不稳定的状态，去激过程复合就产生可见光。为增强电子和空穴的注入和传输能力，通常又在 ITO 和发光层间增加一层有机空穴传输材料或在发光层与金属电极之间增加一层电子传输层，以提高发光效率，则是图 10-18 中的双层结构器件。如果既有空穴传输层，又有电子传输层，则是图 9-9 中的三层结构器件。

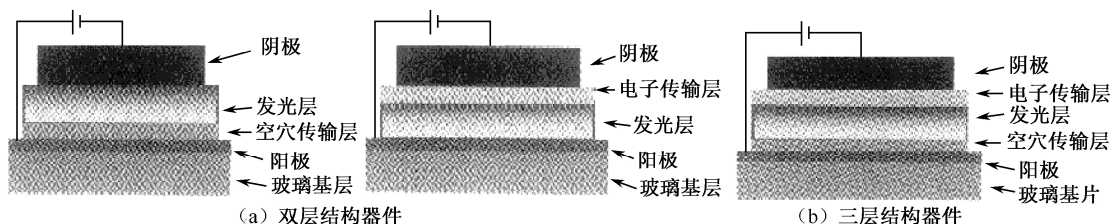


图 9-9 有机薄膜电致发光器件结构

OLED 发光过程的雅布隆斯基 (Jablonski) 能级图如图 9-10 所示。

其能量可以通过以下几种方式释放。

- (1) 通过振动弛豫、热效应等耗散途径使体系能量衰减。
- (2) 通过非辐射的跃迁，耗散能量，如内部转换、系间交叉窜跃等形式，如 $S_1 \rightarrow T_1$ ；
- (3) 通过辐射跃迁的荧光发光 ($S_1 \rightarrow S_0$, $S_2 \rightarrow S_0$) 和磷光发光 ($T_1 \rightarrow S_0$)。

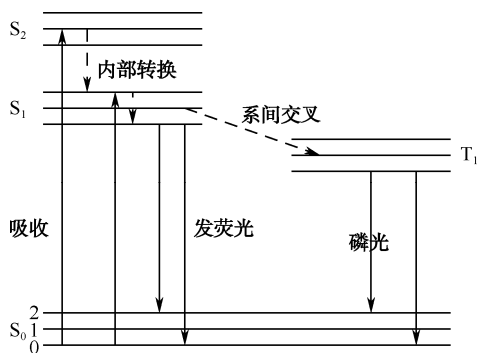


图 9-10 发光过程的雅布隆斯基能级图

在能量释放时，这些不同形式的能量耗散过程是一个相互竞争的过程。由于在常温下，有机分子的磷光非常弱，所以只有其中空穴和电子复合成单重态激子的部分才能通过辐射跃迁发射荧光，从而成为有效的有机电致发光。其中本身能发生辐射跃迁发光的那部分只是所吸收的总体能量中很小的一部分，即总体吸收的能量中能够转化为电致发光部分的能量很少。在器件的制备过程中，材料的缺陷、电极的纯度及不同材料界面对发光强度和整体性能都有很大的影响。

有机小分子电致发光的原理是：从阴极注入电子，从阳极注入空穴，被注入的电子和空穴在有机层内传输。第一层的作用是传输空穴和阻挡电子，使得没有与空穴复合的电子不能进入正电极；第二层是电致发光层，被注入的电子和空穴在有机层内传输，并在发光层内复合，从而激发发光层分子产生单重态激子，单重态激子辐射跃迁而发光。

聚合物电致发光过程为：在电场的作用下，将空穴和电子分别注入共轭高分子的最高占有轨道 (HOMO) 和最低空轨道 (LUMO)，于是就会产生正、负极子，极子在聚合物链段上转移，最后复合形成单重态激子，单重态激子辐射跃迁而发光。

实际上,电致发光机理属于注入式发光,在正向偏压的作用下,ITO 电极向电荷传输层注入空穴,在电场的作用下向传输层界面移动,而由铝电极注入的电子也由电子传输层向界面移动,由于势垒的作用,电子不易进入电荷传输层,而在界面附近的发光层(Alq)一侧积累。由于激子产生的概率与电子和空穴浓度的乘积成正比,在空穴进入 Alq 层后与电子界面处结合而产生激子的概率很大,因而几乎所有的激子都是在界面处与 Alq 层一侧很狭窄的区域(约 36 nm)内产生。因而发光不仅仅是在 Alq 层,而且主要在电子/空穴传输层的界面。

2. OLED 的分类

(1) 按发光材料或分子结构分类。

① 小分子 OLED。在小分子 OLED 中,发光体是离散的分子。八羟基喹啉铝(Alq₃)是常用的发光材料,Alq₃ 可发出波长范围 450~700 nm 的宽带绿光辐射,峰值波长位于 550 nm。如果在 Alq₃ 中加入掺杂剂或用其他原子(如铍)取代铝,就可得到不同颜色的光辐射。Kodak 公司的 C.W.Tang 于 1987 年发表的划时代结果采用的就是 Alq₃。现在 Kodak 公司拥有小分子 OLED 的基本专利。美国新泽西的 UDC(Universal Display Corporation)公司,主要开发电致磷光 OLED 器件,其功率效率居世界领先水平(大于 30 lm/W)。

② 聚合物 OLED(高分子 OLED,简称 PLED)。这类有机发光材料是共轭聚合物,也称高分子型。与小分子不同,聚合物发光材料的成膜可用溶液方法进行处理。通常采用的方法是旋涂法和喷墨打印方法,其中喷墨法是剑桥显示技术公司(CDT)和精工爱普生(SEIKO-EPSON)的专利技术。PLED 是剑桥大学卡文迪许实验室 Friend 小组于 1990 年首次发布的,使用的发光材料是 PPV。PPV 本身是难溶性的,不易加工处理,但 PPV 的前驱物可溶于某些溶剂,如氯仿、甲醇等。目前广泛使用的材料除了 PPV 之外,主要还有 MEH-PPV 和聚芴类材料。剑桥显示技术公司(CDT)成立于 1992 年,该公司拥有 PLED 的基本专利。德国法兰克福的 Cavion 公司,则主要向 PLED 厂商提供聚合物发光材料。

③ 镧系有机金属 OLED(稀土 OLED)。镧系金属有机化合物是介于小分子和聚合物发光材料之间的,它属于稀土类发光材料。由这类材料构成的器件也称为稀土 OLED,在稀土 OLED 中,发光分子由一个金属核心和外围的有机壳层组成。其发光机制与前两类 OLED 不同,加电之后,首先在外围有机壳层中形成激发态,然后将其能量传递给金属核心,金属核心去激时,辐射出颜色比较纯正的光。稀土 OLED 重要特点之一是,单重态和三重态都产生光辐射,其量子效率在理论上可达 100%。因此,它的 PL 和 EL 效率都很高,EL 功率效率的理论值为 120 lm/W。由于是金属核心发光,与小分子和聚合物 OLED 相比,稀土 OLED 的光谱非常窄,半峰宽(FWHM)的典型值只有 100 nm。目前,英国的两家公司正在从事稀土 OLED 产品的开发工作:一家是成立于 1997 年的 Opsys 公司;另一家是成立于 1999 年的 ELAM-T 公司,主要开发镧系金属有机化合物材料,功率效率已经超过 70 lm/W。

(2) 按驱动方式分类。

① 被动矩阵(Passive Matrix)驱动(无源驱动)显示方式。简称 PM-OLED,其实际结构如图 9-11 所示。其中,ITO 玻璃(阳极)和金属电极(阴极)都是平行的电极条,二者相互正交,在交叉点处形成像素,也就是发光的部位 LED。LED 逐行点亮就形成一帧可视图像。由于每一行的显示时间都非常短,要达到正常的图像亮度,每一行的 LED 的亮度都要足够高。每个像素的亮度与施加电流的大小成正比。如一个 100 行的器件,每一行的亮度必须比平均亮度高 100 倍。这就需要很高的电流和电压,从而引起功耗增加,使显示效率急剧下降,这

就使得 PM-OLED 在大面积显示中的应用受到限制。模拟结果表明,当显示面积提高 4 倍时,功率要提高 10 倍。对于 2 英寸的小面积显示器件,PM-OLED 的节能效果比同样尺寸的背光源 LCD 要明显得多;但 10 英寸的大面积 PM-OLED 和相同尺寸的 LCD 相比,节能效果就不复存在了。因此,这就限制了它在大面积显示中的应用。

PM-OLED 易于制造,但其耗电量大于其他类型的 OLED,这主要是因为它需要外部电路的缘故。PM-OLED 用来显示文本和图标时效率最高,适于制作小屏幕(对角线 2~3 英寸),如人们在移动电话、掌上型电脑及 MP3 播放器上经常能见到的那种。即便存在一个外部电路,被动矩阵 OLED 的耗电量,还是要小于这些设备当前采用的 LCD。

② 主动矩阵(Acitive Matrix)驱动(有源驱动)显示方式。简称 AM-OLED,其实际结构如图 9-12 所示。它具有完整的阴极层、有机分子层和阳极层,但阳极层覆盖着一个薄膜晶体管(TFT)阵列,形成一个矩阵。利用类似于 AM-LCD 的制造技术,在玻璃衬底上制作 CMOS 多晶硅 TFT,发光层制作在 TFT 之上。TFT 阵列本身就是一个电路,能决定哪些像素发光,进而决定图像的构成。

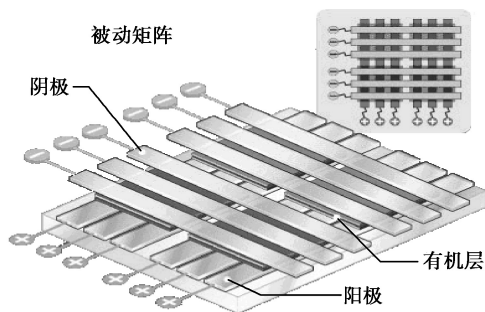


图 9-11 PM-OLED 的实际结构

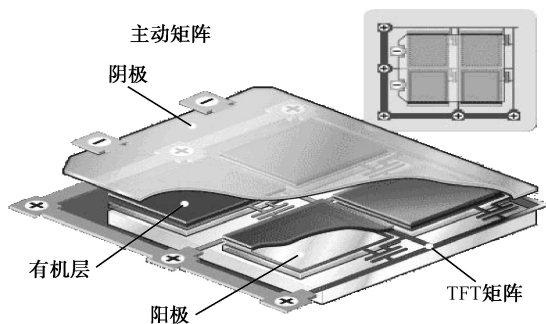


图 9-12 AM-OLED 的实际结构

驱动电路完成两个功能:一是提供受控电流以驱动 OLED;二是在寻址期之后继续提供电流以保证各像素连续发光。和 PM-OLED 不同的是,AM-OLED 的各个像素是同时发光的。这样就大大地降低了单个像素的发光亮度,电压也得到了相应的下降。这就意味着 AM-OLED 的功耗比 PM-OLED 要低得多,是大面积显示比较理想的选择。

一般,驱动 OLED 的薄膜晶体管有以下三种薄膜晶体管技术。

- 低温多晶硅薄膜晶体管 (LTPS TFT)。
- 非晶硅薄膜晶体管 (a-Si TFT)。
- 有机薄膜电晶体 (OTFT)。

低温多晶硅薄膜晶体管相对于另两种晶体管技术,具有较高的载流子(电子或孔穴)迁移率(约 100 倍大)及较高的热稳定性,可提供足够高的电流供应给有机发光二极管。因此,低温多晶硅薄膜晶体管与有机发光二极管两种技术的结合,已成为未来必然的发展趋势。

AM-OLED 的耗电量低于 PM-OLED,这是因为 TFT 阵列所需电量要少于外部电路,因而 AM-OLED 适合大型显示屏。AM-OLED 还具有更高的刷新率,适于显示视频。AM-OLED 的最佳用途是电脑显示器、大屏幕电视及电子告示牌或看板。

有源矩阵的驱动电路藏于显示屏内,更易于实现集成度和小型化。由于解决了外围驱动电路与屏的连接问题,这在一定程度上提高了成品率和可靠性。现在,CDT、精工爱普生、三洋

电机等公司展出的 17 英寸 OLED 采用的就是主动矩阵方式。可以预见, 主动矩阵驱动技术将是今后 OLED 发展普遍采用的方式。

3. OLED 的优缺点

(1) OLED 的优点如下。

- ① OLED 是自发光, 因而视角宽 (超过 170°), 亮度高。
- ② 不存在聚焦, 失真小, 清晰度、色纯全屏一致。
- ③ 不受磁场影响, 无闪烁, 材料绿色环保。
- ④ 响应速度快, 比 LCD 快 1 000 倍, 显示运动画面绝对不会出现拖影现象。
- ⑤ 工作电压低、功耗低, 发光效率高。
- ⑥ 面板超薄 (厚度小于 2 mm)、超轻, 可做能弯曲的柔性显示器。
- ⑦ 生产成本低, 其平均成本不到 LCD 的一半。
- ⑧ 高低温特性好, 温度范围宽 ($-40^\circ\text{C}\sim+85^\circ\text{C}$), 且还耐温差。零下 40°C 时仍能正常显示, 而 LCD 则根本无法做到。
- ⑨ OLED 是全固态器件, 抗震性能非常好, 不怕摔, 适于震动环境使用。

(2) OLED 的缺点。OLED 似乎是一项完美无缺的技术, 适合各类的显示器, 但它目前还存在一些需要解决的缺陷问题。

① 寿命和稳定性问题。影响 OLED 寿命和稳定性的主要原因如下。

- 器件温度升高。因器件在工作过程中除发光外, 还有一部分电能转化为热量, 从而使分子振动加剧, 器件发热温度升高, 这将导致薄膜结晶、界面变化等。
- 氧化。器件封装不够严密 (或在使用过程中泄露空气), 即使有微量空气渗入, 在内部高电场作用下, 氧分子将引起光氧化降解反应, 破坏有机/高分子材料的共轭特性, 使发光效率降低, 导致器件退化。
- 水。在高电场下, 微量的水分都可能会导致电化学反应, 使器件界面遭到破坏。水氧的存在还可能造成电极被腐蚀, 导致电子注入效率下降, 氧化产生的离子可能注入器件发光区, 造成猝灭中心, 进而影响器件的发光效率。
- 杂质。杂质可能成为载流子捕获和生热中心, 引起内部电场的局部畸变, 杂质产生的无辐射中心, 是器件老化的重要原因, 所以有机/高分子材料的提纯是一个很关键的问题。据报道, 每 400 个苯基乙烯基单元中含一个羰基就会使器件的发光猝灭一半。
- EL 器件的光辐射。因为发光层发出的光可能破坏材料分子的化学键。此外, 有机薄膜的厚度、均匀性等都可能影响到器件的稳定性。

② 色度问题。OLED 的大部分发光材料色彩纯度不够, 不容易显示出鲜艳、浓郁的色彩, 尤其是红色的色度性能尤为不良。

③ 大尺寸问题。因为尺寸变大后会出现如驱动形式、扫描方式下材料的寿命、显示屏发光均一化等问题。目前大屏幕显示器成品率低, 因而制造大屏幕显示器的成本偏高, 还不能实现大尺寸屏幕的量产, 因而目前只适用于小尺寸便携类的数码类产品。

我国台湾地区以铱德公司为代表的一批企业已经走到世界 OLED 产业化的前列; 清华大学和维信诺公司已联合建立了国内第一条 OLED 生产线等。相信不久, 在解决好大尺寸 OLED 的长期可靠性和使用寿命等后, OLED 必将成为显示器市场的主流。LCD 花了 15 年时间才超过 CRT 成为电脑显示器的主流技术。专家们预言, OLED 将花费更短的时间超越 LCD。



9.1.5 量子点发光二极管 (QLED) 显示技术

由前一节可知,在视觉的明度和节能方面,很少有显示技术能与 OLED (有机发光二极管技术) 媲美。但目前 OLED 多被应用于手机类小型的显示设备上, OLED 的生产技术正在克服前述问题,努力向制造如计算机显示器或者电视机等大型化的设备迈进。

量子点 QLED 显示技术主要包括量子点发光二极管显示技术 (QLED) 和量子点背光源技术 (QD-BLU)。下面在介绍量子点 QLED 显示技术前,需要先了解量子点的概念。

1. 量子点的基本概念

(1) 量子点的含义。量子点 (Quantum Dot) 这个听来有些科幻的名字是美国耶鲁大学物理学家马克·里德提出的,也往往被叫成纳米点或者零维材料。量子点是一类特殊的纳米材料,往往是由砷化镓、硒化镉等半导体材料为核,外面包裹着另一种半导体材料而形成的微小颗粒。每个量子点颗粒的尺寸只有几纳米到数十纳米,包含了几十到数百万个原子。因为其体积的微小,让内部电子在各方向上的运动都受到局限,所以量子限域效应特别显著,也让它能发出特定颜色的荧光。在受到外界光源的照射后,量子点中的电子吸收了光子的能量,从稳定的低能级跃迁到不稳定的高能级,而在恢复稳定时,将会将能量以特定波长光子的方式放出。这种激发荧光的方式与其他半导体分子相似;而不同的是,量子点的荧光颜色,与其大小紧密相关,只需要调节量子点的大小,就可以得到不同颜色的纯色光。

量子点是在把导带电子、价带空穴及激子在三个空间方向上束缚住的半导体纳米结构。量子点,电子运动在三维空间都受到了限制,因此有时被称为人造原子、超晶格、超原子或量子点原子,是 20 世纪 90 年代提出来的一个新概念。这种约束可以归结于静电势(由外部的电极、掺杂、应变、杂质产生),两种不同半导体材料的界面(如在自组量子点中),半导体的表面(如半导体纳米晶体),或者以上三者的结合。量子点具有分离的量子化的能谱。所对应的波函数在空间上位于量子点中,但延伸于数个晶格周期中。一个量子点具有少量的(1~100 个)整数个的电子、空穴或电子空穴对,即其所带的电量是元电荷的整数倍。

量子点又可称为纳米晶,是一种由 II-VI 族或 III-V 族元素组成的纳米颗粒。量子点的粒径一般介于 1~10 nm,由于电子和空穴被量子限域,连续的能带结构变成具有分子特性的分立能级结构,受激后可以发射荧光。基于量子效应,量子点在太阳能电池,发光器件,光学生物标记等领域具有广泛的应用前景。科学家已经发明许多不同的方法来制造量子点,并预期这种纳米材料在 21 世纪有极大的应用潜力。

小的量子点,如胶状半导体纳米晶,可以小到只有 2~10 nm,这相当于 10 到 50 个原子的直径的尺寸,在一个量子点体积中可以包含 100~100 000 个这样的原子,自组装量子点的典型尺寸在 10~50 nm。通过光刻成型的门电极或者刻蚀半导体异质结中的二维电子气形成的量子点横向尺寸,可以超过 100 nm。将 10 nm 尺寸的 300 万个量子点首尾相接排列起来,可以达到人类拇指的宽度。

量子点按其几何形状,可分为箱形量子点、球形量子点、四面体量子点、柱形量子点、立方量子点、盘形量子点和外场(电场和磁场)诱导量子点;按其电子与空穴的量子封闭作用,量子点可分为 1 型量子点和 2 型量子点;按其材料组成,量子点又可分为元素半导体量子点,化合物半导体量子点和异质结量子点。此外,原子及分子团簇、超微粒子和多空硅等也都属于

量子点范畴。

(2) 量子点的主要性质。

① 量子点的发射光谱可以通过改变量子点的尺寸大小来控制。通过改变量子点的尺寸和它的化学组成可以使其发射光谱覆盖整个可见光区。以 CdTe 量子为例, 当它的粒径从 2.5 nm 生长到 4.0 nm 时, 它们的发射波长为 510~660 nm。

② 量子点具有很好的光稳定性。量子点的荧光强度比最常用的有机荧光材料罗丹明 6G 高 20 倍, 它的稳定性更是罗丹明 6G 的 100 倍以上。因此, 量子点可以对标记的物体进行长时间的观察, 这也为研究细胞中生物分子之间长期相互作用提供了有力的工具。

③ 量子点具有宽的激发谱和窄的发射谱。使用同一激发光源就可实现对不同粒径的量子点进行同步检测, 因而可用于多色标记, 极大地促进了荧光标记的应用。而传统的有机荧光染料的激发光波长范围较窄, 不同荧光染料通常需要多种波长的激发光来激发, 这给实际的研究工作带来了很大不便。此外, 量子点具有窄而对称的荧光发射峰, 且无拖尾, 多色量子点同时使用时不容易出现光谱交叠。

④ 量子点具有较大的斯托克斯位移。量子点不同于有机染料的另一光学性质就是宽大的斯托克斯位移, 这样可以避免发射光谱与激发光谱的重叠, 有利于荧光光谱信号的检测。

⑤ 生物相容性好。量子点经过各种化学修饰之后, 可以进行特异性连接, 其细胞毒性低, 对生物体危害小, 可进行生物活体标记和检测。

⑥ 量子点的荧光寿命长。有机荧光染料的荧光寿命一般仅为几纳秒 (这与很多生物样本的自发荧光衰减的时间相当)。而量子点的荧光寿命可持续 20~50 ns, 这使得当光激发后, 大多数的自发荧光已经衰变, 而量子点荧光仍然存在, 此时即可得到无背景干扰的荧光信号。

总而言之, 量子点具有激发光谱宽且连续分布, 发射光谱窄且对称, 颜色可调, 光化学稳定性高, 荧光寿命长等优越的荧光特性, 是一种理想的荧光探针。

(3) 量子点的物理效应。量子点独特的性质基于它自身的量子效应, 当颗粒尺寸进入纳米量级时, 尺寸限域将引起尺寸效应、量子限域效应、宏观量子隧道效应和表面效应, 从而派生出纳米体系具有常观体系和微观体系不同的低维物性, 展现出许多不同于宏观体材料的物理化学性质, 在非线形光学、磁介质、催化、医药及功能材料等方面具有极为广阔的应用前景, 同时将对生命科学和信息技术的持续发展, 以及物质领域的基础研究发生深刻的影响。

① 量子尺寸效应。通过控制量子点的形状、结构和尺寸, 就可以方便地调节其能隙 (即禁带) 宽度、激子束缚能的大小, 以及激子的能量蓝移等电子状态。随着量子点尺寸的逐渐减小, 量子点的光吸收谱出现蓝移现象。尺寸越小, 则谱蓝移现象也越显著, 这就是所谓的量子尺寸效应。

② 表面效应。它是指随着量子点的粒径减小, 大部分原子位于量子点的表面, 量子点的比表面积随粒径减小而增大。由于纳米颗粒大的比表面积, 表面相原子数的增多, 导致了表面原子的配位不足、不饱和键和悬键增多, 使这些表面原子具有高的活性, 极不稳定, 很容易与其他原子结合。这种表面效应将引起纳米粒子大的表面能和高的活性。表面原子的活性不但引起纳米粒子表面原子输运和结构型的变化, 同时也引起表面电子自旋构象和电子能谱的变化。表面缺陷导致陷阱电子或空穴, 它们反过来会影响量子点的发光性质、引起非线性光学效应。金属体材料通过光反射而呈现出各种特征颜色, 由于表面效应和尺寸效应使纳米金属颗粒对光反射系数显著下降, 通常低于 1%, 因而纳米金属颗粒一般呈黑色, 粒径越小, 颜色越深, 即纳米颗粒的光吸收能力越强, 呈现出宽频带强吸收谱。

③ 介电限域效应。由于量子点与电子的 De Broglie 波长、相干波长及激子 Bohr 半径可比



拟,电子局限在纳米空间,电子输运受到限制,电子平均自由程很短,电子的局域性和相干性增强,将引起量子限域效应。对于量子点,当粒径与 Wannier 激子 Bohr 半径相当或更小时,处于强限域区,易形成激子,产生激子吸收带。随着粒径的减小,激子带的吸收系数增加,出现激子强吸收。由于量子限域效应,激子的最低能量向高能方向移动即蓝移。最新的报道表面,日本 NEC 已成功地制备了量子点阵,在基底上沉积纳米岛状量子点阵列。当用激光照射量子点使之激励时,量子点发出蓝光,表明量子点确实具有关闭电子的功能的量子限域效应。当量子点的粒径大于 Wannier 激子 Bohr 半径时,处于弱限域区,此时不能形成激子,其光谱是由带间跃迁的一系列线谱组成的。

④ 量子隧道效应。传统的功能材料和元件,其物理尺寸远大于电子自由程,所观测的是群电子输运行为,具有统计平均结果,所描述的性质主要是宏观物理量。当微电子器件进一步细微化时,必须要考虑量子隧道效应。100 nm 被认为微电子技术发展的极限,原因是电子在纳米尺度空间中将有明显的波动性,其量子效应将起主要功能。电子在纳米尺度空间中运动,物理线度与电子自由程相当,载流子的输运过程将有明显电子的波动性,出现量子隧道效应。电子的能级是分立的,利用电子的量子效应制造的量子器件,要实现量子效应,要求在几个 μm 到几十个 μm 的微小区域形成纳米导电域。电子被锁在纳米导电区域,电子在纳米空间中显现出的波动性产生了量子限域效应。纳米导电区域之间形成薄薄的量子势垒,当电压很低时,电子被限制在纳米尺度范围运动,升高电压可以使电子越过纳米势垒形成费米电子海,使体系变为导电。电子从一个量子阱穿越量子势垒进入另一个量子阱就出现了量子隧道效应,这种绝缘到导电的临界效应是纳米有序阵列体系的特点。

⑤ 库仑阻塞效应。当一个量子点与其所有相关电极的电容之和足够小的时候,只要有一个电子进入量子点,系统增加的静电能就会远大于电子热运动能力,这个静电能将阻止随后的第二个电子进入同一个量子点,这就是库仑阻塞效应。

2. 量子点背光源技术 (QD-BLU)

目前最成熟的 QLED 应用是用于改善液晶显示设备的显示效果,这种应用中采用到的是三原色的光致发光 QLED 材料。量子点具有发光特性,量子点薄膜(QDEF)中的量子点在蓝色 LED 背光照射下生成红光和绿光,并同其余透过薄膜的蓝光一起混合得到白光,从而能提升整个背光系统的发光效果。

量子点 QLED 显示技术与众不同的特性,每当受到光或电的刺激,量子点便会发出有色光线,光线的颜色由量子点的组成材料和大小形状决定,量子点能够将 LED 光源发出的蓝光完全转化为白光(传统 YAG 荧光体只能吸收一部分),这意味着在同样的亮度下,量子点 QLED 所需的蓝光更少,在电光转化中需要的电力亦更少,从而有效降低背光系统的功耗总成。

如在 iPhone6 和 TCL 的 QLED 电视中,QLED 起到的作用是改变液晶显示背光源的品质。目前,白光 LED 光源是超薄、节能液晶显示设备的主流光源。这种光源的 LED 灯主要由发蓝色光的 LED 芯片和对应的红色、绿色荧光粉构成。这种设计的问题在于,荧光粉的转化效率并不是特别高、色彩纯度也有限这两个缺点。前者导致液晶电视能耗水平一直高于 OLED,后者导致液晶电视色彩表现比 OLED 差。

但是,在应用 QLED 技术后,液晶显示的背光系统可以是另一种状态:QLED 技术的液晶背光源中,LED 发光器件选择蓝色的(不是白色,也不是红绿蓝三种,之所以选择蓝色,是因为蓝色 LED 的效率最高、成本最低),蓝色的 LED 光通过导光板形成平行的面蓝色光源,然

后照射到涂覆有 QLED 物质的另一个薄膜上,不同种类和数量的 QLED 量子点物质将蓝色 LED 的光,按比例转化成红绿蓝三原色,并合成液晶显示需要的高品质白色背光源。

液晶显示应用 QLED 技术之后,背光源的色彩转换效率大幅度提升,同时原色的纯度也大幅度提升。前者使得电视机和手机更为节能,后者则使得电视机和手机的色彩表现力显著提升。

当然,任何技术都不会是完美的。QLED 技术目前用于改善液晶显示设备的显示效果,也会产生副作用:这些副作用主要是,QLED 材料的热稳定性不好,这就要求采用该技术的液晶显示设备更注重散热;QLED 材料在空气中的稳定性不好,这就需要注意采用该技术后的显示设备相关组件的密封;同时,QLED 的材料寿命低于传统的荧光粉很多(目前和 OLED 材料寿命相当或者略长),QLED 材料会成为采用该技术的液晶显示设备的寿命瓶颈。尤其是在个别 QLED 材料寿命只有 1 万~3 万小时的背景下,对比传统 LED 光源 10 万小时的寿命,差异巨大。

用 QLED 加强 LCD 背光后液晶显示的结构如图 9-13 所示。

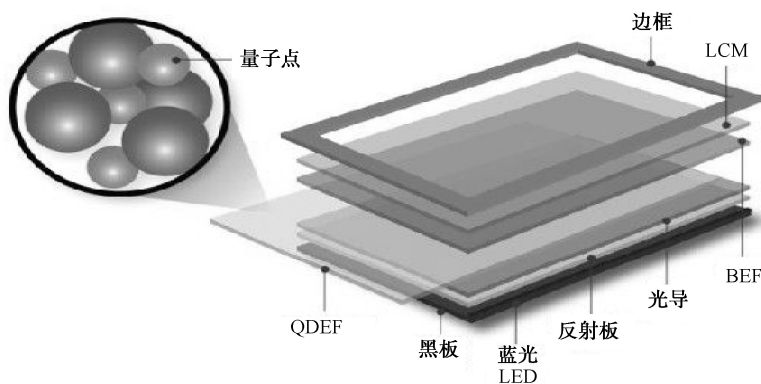


图 9-13 用 QLED 加强 LCD 背光后液晶显示的结构图

传统液晶显示技术的画面效果瓶颈主要由液晶反应速度、滤光膜效果和背光源系统提供的背光品质决定。而 QLED 可以显著改善背光源的品质。同时,在产品工艺上,QLED 材料层可以和液晶背光源模组、背光模组中的导光板,甚至液晶和 TFT 工艺层混合,具有多种工艺和架构选择,可以让液晶显示厂商选择最为经济合理的技术方案。更为重要的是,这些技术路线中的任何一个,都不会较大地改变现有的产品生产工艺和流程体系。也就是说,引入 QLED 技术的液晶产品,制造成本的增长有限。同时,可以和液晶面板结合,也可以和背光源模组结合的特点,使得 QLED 可以在整机厂商或者面板厂商的产业链阶段同时渗透,采用该技术制造显示设备整机企业,不需要 100%依赖面板厂商。

目前,液晶显示行业已经把应用 QLED 作为改善液晶画质品质的关键突破点。但是,QLED 创造的想象空间还远不止这些,QLED 还可以抛弃液晶成为独立的显示技术门类,这就是下面论述的量子点发光二极管显示技术。

3. 量子点发光二极管显示技术 (QLED)

据报道,2005 年,毕业于麻省理工大学的科尔·苏利文创建 QD Vision 公司,随后 QD Vision 联手韩国 LG Display 和比利时化学品公司 Solvay,研究并制造了 QLED 有源矩阵显示屏。与目前的显示屏相比,QLED 在大大提高了亮度和画面鲜艳度的同时,还减少了能耗。

该产品能够进行商业化生产并能同有机发光显示屏 (OLED) 相竞争。如制造 OLED 时,需要



使用一个“阴罩”，当屏幕尺寸变大时，阴罩板容易发生热胀冷缩，会使得色彩等不够精确。而 QLED 的制造过程不需要使用阴罩，因此不会出现精确度减少的问题。另外，量子点还可悬停在液体中，并使用多种技术让其沉积，包括将其喷墨打印在非常薄的、柔性或者透明的衬底上。

OLED 还有一处不足，其纯色需用彩色过滤器才能产生，而 QLED 从一开始就能产生各种不同纯色，也在将电子转化为光子方面优于 OLED，因此能效更高，制造成本更低。在同等画质下，QLED 的节能性有望达到 OLED 屏的 2 倍，发光率将提升 30%~40%。

2012 年，浙江大学高新材料化学中心有合成化学背景的彭笑刚课题组和具有制备溶液工艺光电器件经验的金一政等科学家紧密合作，在首先解决了量子点合成化学方面的问题后，通过在器件中插入一层超薄绝缘层，很好地解决了载流子平衡注入这一困扰 QLED 领域多年的难题，从而设计出一种新型的量子点发光二极管（QLED）。并且，其制备方法基于低成本、有潜力应用于大规模生产的溶液工艺，其综合性能则超越了已知的所有溶液工艺的红光器件，尤其是将使用亮度条件下的寿命推进到 10 万小时的实用水平。这种新型的 QLED 使用的发光材料是可溶的无机半导体纳米晶（即量子点），这种高效的无机发光中心同时可以兼容溶液工艺。金一政说：“采用溶液工艺制备光电器件具有高速度、低成本的优势，其制备过程有可能如同印刷报纸一样简单高效，还有可能采用轻薄、柔性的塑料基板。”

（1）量子点发光二极管的结构原理。和 OLED 类似，量子点屏的每种颜色的像素都和一个薄膜发光二极管对应，由二极管发光为量子点提供能量，激发量子点发出不同强度、不同颜色的光线，在人眼中组合成一幅图像。由于量子点发光波长范围极窄，颜色非常纯粹，所以量子点屏幕的画面比其他屏幕都要更清新明亮。

QLED 是利用单反射镜结构的量子点结构制造的发光二极管，如图 9-14 所示。这个器件的有源层是由 InAs 量子点层组成的，InAs 量子点层被离开器件表面的镀金反射镜的 InGaAs 层包覆。为了限制注入的载流子，利用一个单量子点层有源区，而 InGaAs 层生长在 GaAs 衬底和有源区之间。为了提高输出信号光功率，单量子点层位于离开表面反射镜发光 $\lambda/2$ 的位置。这样，由反射镜反射的光信号不断地与来自有源层下面的辐射发光作用，从而使衬底收集的光信号功率增大 4 倍。并且，人们已经成功地研制出工作波长为 1 310 nm 和 1 550 nm 时，输出光功率可以达到 10 mW 的 QLED。

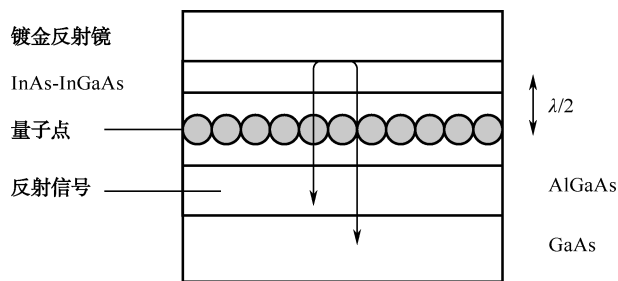


图 9-14 量子点发光二极管的结构原理

目前，已经研制出了外量子效率大于 20% 的带有谐振腔的 QLED。对于那些没有谐振腔的 QLED，可以通过在发光二极管表面引入一个薄的有源层来提高外量子效率。这样的器件被称为表面织结薄膜发光二极管，在这种组织结构中，经过全内反射的光信号，再通过织构顶面散射，从而改变了光信号的传播角度，来自后反射镜反射的光信号可以耦合至发光二极管的输出。现在，已经研制出了没有谐振腔的 QLED，其在 1Gb/s 以上的传输速度的外量子效率可以达到

29%。如果在光器件的顶部再配置光学透镜,可以使光器件的量子效率提高 40%。

过去 10 多年来,研究人员一直在研究量子点显示器。过去是把量子点喷在基底材料表面作涂层,类似于喷墨打印。这种技术要把量子点溶解在有机溶剂中,会污染显示器,降低色彩亮度和能效。为克服这一缺点,研究人员找到一种压印的方法,用有图案的硅片造出一种“墨水印章”,然后用“印章”来选取大小合适的量子点,不需要溶剂,就可将它们压在薄膜基片上,平均每平方厘米约分布 3 万亿个量子点。用这种方法制成的显示器密度和量子一致性都更高,能产生更明亮的画面,能效也比以前更高。研究人员指出,新技术印制量子点显示器是在柔软薄膜上,在可卷曲便携式显示器、柔软发光设备、光电设备等领域该技术都会有广泛应用。

(2) 量子点发光二极管(QLED)的优势。目前,业界如三星已在研发可弯曲的 OLED 屏幕,但 QLED 屏幕将比它更薄、更容易卷起。QLED 的狭义定义为尺度小于 10nm 之零维半导体晶体,它的大小只有人类头发的 1/100 000。科学家研究出把这种晶体印刷到柔韧有弹性的塑料上,可便于携带,甚至印刷到更大张的薄板上创造出巨型屏幕。由于 QLED 的体积非常小,因此制造商能自由决定放射波长,即人眼所见的光的颜色,可在生产过程中调整任何颜色,做出彩色屏幕。当前市面上多数电视是使用由 LED 作为背光源的 LCD 屏幕,厚度多为数毫米。应用 QLED 技术,则可达到史上最轻、最薄的境界,影像质量也较 LCD 和 OLED 屏幕来得好,并维持得更久。

相比于液晶显示设备(LCD),OLED 的优势非常明显,其更薄更轻,显示效果也更好,尤其是在能耗方面(能耗仅为 LCD 的 10%~20%)。但因为 OLED 使用的是有机材料,显示设备的寿命比 LCD 要短很多,并且技术成本也很高,当屏幕尺寸变大时,阴罩板容易发生热胀冷缩,会使得色彩等不够精确。这限制了 OLED 在大尺寸屏幕上的应用。

量子点发光二极管(QLED)与 OLED 相比,具有更大的优越性,其优势如下。

- QLED 屏比 OLED 屏更亮、寿命更长,不使用阴罩,可应用于大屏幕。
- QLED 屏比 OLED 屏生产成本低,QLED 屏采用了稳定可靠的无机半导体材料,这降低了生产成本;在将电子转化为光子方面也优于 OLED,能效更高,制造成本更低;QLED 屏生产成本还不到 OLED 屏的一半,因而更适用于大规模市场推广。
- QLED 屏比 OLED 屏能耗小,量子点能够将 LED 光源发出的蓝光完全转化为白光,而不是像 OLED 那样只能吸收一部分,这意味着在同样的灯泡亮度下,量子点 LED 灯所需的蓝光更少,在电光转化中需要的电力自然更少,因而更加节能。在同等画质下,QLED 的节能性有望达到 OLED 屏的 2 倍。
- QLED 屏比 OLED 屏电光转换效率或发光效率高,发光率将提升 30%~40%。并且,它不存在散热的问题,可用于大面积和家庭照明。同时 OLED 可以达到与无机半导体材料一样的稳定性、可靠性。
- QLED 屏比 OLED 屏色纯度高,OLED 的纯色需用彩色过滤器才能产生,而 QLED 从一开始就能产生各种不同纯色,其颜色纯度是现有产品的 2 倍,并且光线非常柔和,色彩更丰富。
- OLED 在封装过程中要求条件很高,QLED 则受条件限制较少。

不过,QLED 的发展也面临着两个挑战,其一是寿命短,最好的 QLED 寿命仅为 1 万小时,这对大尺寸显示屏来说还不够;其二是需要确保色彩能始终如一地再现。目前,已经在这两方面取得了很大进步,QLED 即将开始商业化生产。

(3) QLED 电视与 4K 超高清液晶电视画质比较。下面我们再看量子点 QLED 显示技术所显示的画质情况。与其对比的是一台高端 4K 超高清液晶电视(基于 WLED 背光技



术)对多个场景的对比效果。

QLED 屏与 4K 超高清液晶电视屏对同一野外场景的显示比较,如图 9-15 所示。



图 9-15 QLED 屏与 4K 超高清液晶电视屏对同一野外场景的显示比较

QLED 屏与 4K 超高清液晶电视屏对同一人像的显示比较如图 9-16 所示。



图 9-16 QLED 屏与 4K 超高清液晶电视屏对同一人像的显示比较

由图可见,尽管实拍对比图已经“缩小”两种显示技术的画质差异,但量子点 QLED 显示技术已经在各个方面无悬念压制传统 4K 超高清液晶电视,无论是画面的透亮程度、色彩纯度、暗部细节等,量子点 QLED 显示技术的确在画质表现上令人感到惊讶。事实证明,上述我们对量子点 QLED 显示技术的技术解析,并非言过其实。

虽然,QLED 量子屏技术处于初期阶段,依旧有技术改善的空间,但该技术具有非常好的市场前景。目前,国内外已经取得很大的进展,QLED 必将开始展现巨大的商业价值。

9.2 投影显示技术

投影显示是指由平面图像信息控制光源,利用光学系统和投影空间把图像放大并显示在屏幕上的方法或装置。它由光学成像系统最终来完成图像的显示,在生活中应用广泛,如教学,现在所用的基本都是投影显示。由于投影显示屏幕较大,显示清晰是最大的特点,因而方便教学。因此,投影显示技术适应了大屏幕显示的要求,特别是 HDTV 的要求。经过 60 年的研究和开发,投影显示技术已经比较成熟,广泛地应用于学校、宾馆、影院、会议室和家庭中等。

过去,我们看到和用到的多是 CRT、PDP、LCD、LED 等的投影显示技术,但目前则多应

用 LCOS、DLP（用 DMD）、LV、激光等新型投影显示技术，下面就予以论述。

9.2.1 硅基液晶投影显示技术

普通液晶显示器由于采用透射式工作方式，会造成照射光被吸收，从而导致亮度不高，因而液晶显示器用途受到一定的限制。而硅基液晶（Liquid Crystal On Silicon, LCOS）显示器由于采用了反射式装置，在功耗相同的情况下，光源产生的光将更多地通过光学传输介质，从而提高显示器亮度。

LCOS 显示是一种新型微显示技术，也是一种全新的数码成像技术，称为数字硅基反射液晶显示技术，它是采用半导体 CMOS 集成电路芯片作为反射式 LCD 的基片。CMOS 芯片上涂有薄薄的一层液晶，控制电路置于显示装置的后面，可以提高透光率，从而实现更大的光输出和更高的分辨率。

1. 硅基液晶显示器的结构

硅基液晶是由 Aurora Systems 融合半导体和液晶两项技术的优势，在 2000 年开发出来的分辨率更高、价格却可能更低的新技术。由于 LCOS 采用半导体的方式来控制分辨率，而较高的分辨率又导致较小的画面颗粒，所以画质自然真实。LCOS 技术代表了倍频扫描电视和计算机显示器的完美结合，分割画面和多重扫描可使其应用多样化、生活化和人性化。

LCOS 面板的结构有些类似 TFTLCD，在上下两层基板中间撒布间隔物（Spacer）以便加以隔绝。然后在基板间填充液晶以形成光阀，这样便可以由电路的开关来驱动液晶分子的旋转，以决定画面的明与暗。与 TFTLCD 面板不同的是，LCD 上下两面都以玻璃作为基板，而 LCOS 仅上面采用 ITO 导电玻璃，底层基板则是硅晶圆 CMOS 基板（玻璃基片与 CMOS 硅芯片之间的间隔是 $2\mu\text{m}$ ），将液晶材料涂于 CMOS 硅芯片表层，芯片包含了控制电路，并在表层涂有反射层。

LCOS 结构包括 CMOS 基板、ITO 玻璃、配向层、间隔物与液晶层等，如图 9-17 所示。

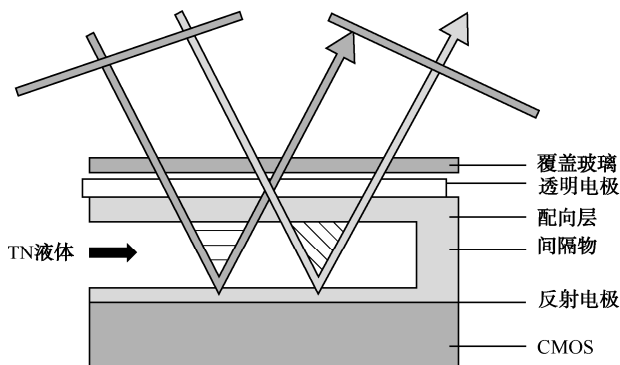


图 9-17 LCOS 的结构

由图可知，在芯片外部或者内圈设置有隔离器以保持盒厚的均匀性（盒厚只有 $1\mu\text{m}$ 左右）；配向层可以确保液晶分子趋向一致；由于液晶需通过一部分电流，因而在晶体上部加设了一个次级透明电极；玻璃基板用以保护液晶和稳定液晶的位置。反射电极层位于液晶层的下面，而像素地址寻址的各种控制电极和电极间的绝缘层，位于反射电极层的下面，整个结构是一个立



体排列方式。

LCOS 面板最大的特色在于下基板的材质是单晶硅,因此拥有良好的电子迁移率,而且单晶硅可制作成较细的线路,与现有的 HTPS LCD 及 DLP 投影面板相比较,LCOS 更容易达到高分辨率的投影技术。由于 LCOS 液晶板的光圈比率可以达 93%,因此其分辨率可以很高。

在 LCOS 微显示器中,采用的是扭曲向列相液晶材料,当电流到达液晶体时,液晶分子的扭曲程度会发生变化。根据这个原理,光束要首先通过一个起偏器以使光波传播保持特定的偏振方向,然后在液晶介质中光的偏振方向随着液晶分子的扭曲方向的变化而变化,接着光束又经过 LCOS 反射表面的定向反射,最后穿过一个检偏器。

2. LCOS 投影显示器的原理及其优缺点

(1) LCOS 投影显示器的工作原理。LCOS 投影显示的原理与 LCD 投影机一样,只是 LCD 投影机是利用光源穿过 LCD 面板做调变,而 LCOS 面板是以 CMOS 芯片的电路基板及反射层,然后涂布液晶层后,以玻璃平板封装。该制作过程的关键在于如何使得上下两块面板之间保持平坦平行,尤其是对较大尺寸的 LCOS 面板。

因此,LCOS 投影显示器的工作原理是,因单晶硅片下面制造了控制电路,可控制每个液晶像素的工作状态。当穿过液晶像素的光被下层硅片上的反射电极反射回去,再次穿过液晶像素时,利用液晶分子对光源透过率的改变,而形成图像光信号。这种图像光信号再通过光学系统和投影系统,把图像光信号聚焦、放大而投射到屏幕上,以形成彩色图像。

LCOS 投影显示器有单片 LCOS 投影显示器和三片 LCOS 投影显示器两种。

(2) LCOS 投影显示器的优点如下。

- 与 LCD 显示器的优点大致相同,图像失真小,属固定分辨率显示器件,全屏清晰度相同,会聚不受地磁场影响。
- 易于实现平板显示,易于实现逐行寻址和高场频显示,可以消除行间闪烁和图像大面积闪烁。
- 三片式 LCOS 投影显示亮度高,开口率(也称为填充因子)达 90%。
- 分辨率高,有可能实现 HDTV 显示。

(3) LCOS 投影显示器的缺点如下。

- 成品率低,售价高,但面板制作易于小型化,现有多家厂商投入研发,可形成降低成本的空间。
- 芯片制造困难。
- 投影灯泡有寿命问题。

目前,LCOS 投影显示技术正朝着扩展可视角、降低惰性、降低价格、提高背光源(灯泡)寿命等方面发展,并已取得了可喜进展。

3. 硅基液晶技术特色及与其他显示技术的比较

(1) LCOS 技术特色。常用在投影机上的高温多晶硅 LCD,通常用透射式投射的方式,其光利用效率只有 3%左右,分辨率低,并且需要有特殊的工艺制作过程,成本不易降低;LCOS 则属于新型的反射式微显示投影技术,光利用效率可达 40%以上,而且其最大的优势是可利用最便宜的 CMOS 制作工艺,无须额外的投资,并可随半导体制作工艺快速的微细化,其特点是环保、节能、体积小、便宜、分辨率高。因此,硅基液晶投影技术特色是:高分辨率;高亮

度；低成本。

(2) LCOS 技术与其他显示技术的比较。LCOS 与 CRT、PDP、OLED、LCD、DLP 在寿命、价格、耗能、分辨率、尺寸、像素点、视角、视频、颜色等方面参数的比较, 如表 9-2 所示。

表 9-2 LCOS 与其他显示技术的比较

种类	寿命/h	价格	耗能	分辨率	尺寸	像素点	视角/°	视频	颜色
CRT	15 000	低	高	1 600×1 200	4"~42"	0.21 mm	160	可	1 600 万
PDP			高		25"~50"	0.13 mm	360	可	1 600 万
OLED	10 000	低	低	852×222	4"	0.57 mm			1 600 万
LCD	30 000	低	低	1 024×168	5"~22"	0.21 mm	150	慢	1 600 万
DLP	15 000	中	低	1 280×1 024	1.2"	12 μm	160	可	1 600 万
LCOS	15 000	中	低	1 376×1 024	0.7"~1.2"	14 μm	160	可	1 600 万

9.2.2 使用数字微镜器件的 DLP 投影显示技术

数字微镜器件 (Digital Micro-Mirror Device, DMD) 是由美国 TI 的科学家 Larry J.Hom-Beck 在 1987 年发明的, 它是一种快速响应、反射式的数字光开关器件。目前, 其显示分辨率已达 2 048×1 080 像素。一块 1 280×1 024 像素的 DMD, 它含有 130 万个规则排列相互铰接的微型反射镜, 每个反射镜的大小约 16 μm×16 μm, 反射镜之间的间隔约 1 μm。因此, 可以将 DMD 与图像信号、光源和光学投影单元, 彼此协调组合成一个图像显示系统。由于其优越的技术性能, DMD 近年在多媒体数字投影仪、高清晰度电视和数字电影院系统中得到广泛的应用。

1. 数字微镜器件的结构和工作原理

一块 DMD 是由成千上万个微小的、可倾斜的铝合金镜片组成, 这些镜片被固定在隐藏的铰上, 扭转铰链结构连接铰和支柱, 并允许镜片旋转±10° (最新产品为±12°)。支柱连接下面的偏置/复位总线, 偏置/复位总线连接起来使得偏置和复位电压能够提供给每个镜片。镜片、铰链结构及支柱都在互补金属氧化物半导体 (CMOS) 上地址电路及一对地址电极上形成。在一个地址电极上加上电压, 连带着把偏置/复位电压加到镜片结构上, 将在镜片与地址电极一侧产生一个静电吸引, 镜片倾斜直到与具有同样电压的着陆点电极接触为止。在这点, 镜片以机电方式锁定在位置上。在存储单元中存入一个二进制数字 1, 使镜片倾斜+10°; 同时在存储单元中存入一个二进制数字 0, 使镜片倾斜-10°。

图 9-18 是一个 DMD 上单独镜片的结构分解示意图。DMD 上每一个 16 μm×16 μm 的镜片包括这样三个物理层和两个空气隙层, 空气隙层分离三个物理层, 并且允许镜片倾斜+10° 或 -10°。

DMD 上的每一微反射镜都能将入射的光线从两个方向反射出去, 实际反射方向则视底层存储单元的状态而定; 当存储单元处于 ON 状态时, 反射镜会旋转至+12°, 若存储单元处于 OFF 状态, 反射镜会旋转至-12°。只要结合 DMD 以及适当光源和投影光学系统, 反射镜就会把入射光反射进入或是离开投影镜头的透光孔, 使得 ON 状态的反射镜看起来非常明亮, OFF 状态的反射镜看起来就很黑暗。利用二位脉冲宽度调变可以得到灰阶效果, 如果使用固定式或旋转式彩色滤镜, 再搭配一枚或三枚 DMD 芯片, 即可得到彩色显示效果。

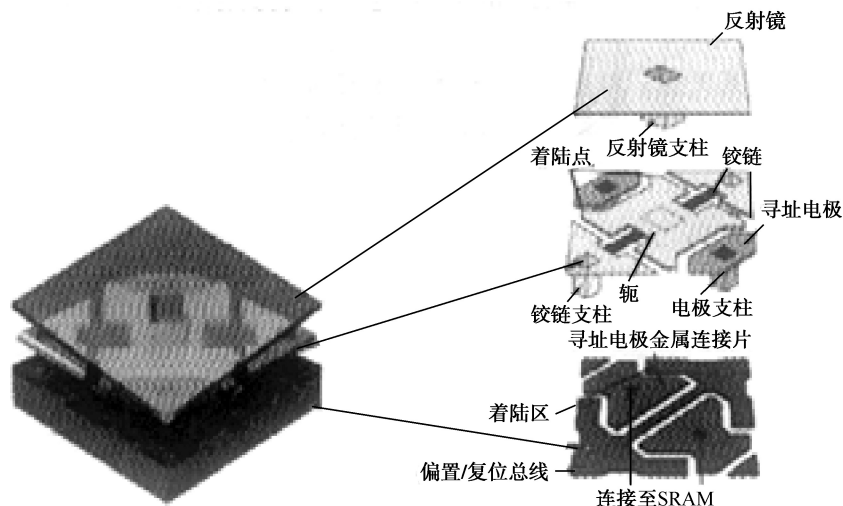


图 9-18 DMD 中单个反射镜的结构

DMD 的输入是由电流代表的电子字符，输出则是光学字符，这种光调变或开关技术又称为二位脉冲宽度调变，它会把 8 位数字字符送至 DMD 的每个数字光开关输入端，产生 28 或 256 级灰阶。最简单的地址序列是将可供使用的字符时间分成 8 个部分，再从最高有效位（MSB）到最低有效位（LSB），依序在每个位时间使用一个地址序列。当整个光开关数组都被最高位寻址后，将各个像素致能（重设），使它们同时对最高有效位的状态（1 或 0）做出反应。在每个位时间，下个位会被加载内存数组，等到这个位时间结束时，这些像素会被重设，使它们同时对下一个地址位做出反应。此过程会不断重复，直到所有的地址位都加载内存。

入射光进入光开关后，会被光开关切换或调变成为一群光包，然后反射出来，光包时间则是由电子字符的个别位所决定。对于观察者来说，由于光包时间远小于眼睛的视觉暂留时间，因此他们将会看到固定亮度的光线。

2. 使用数字微镜器件的投影系统

DMD 为美国德州仪器公司研发的成像器件，它为数字光学处理器（Digital Light Processor，DLP）的实现提供了技术保障，从而使 DLP 技术开辟了投影机技术发展的数字时代。

DLP 投影成像系统有单片 DMD 式、二片与三片式三种：单片式主要用在便携式投影产品；二片式主要用于大型拼接显示墙；三片式则主要用于屏幕和高亮度应用领域，如数字电影院。DLP 投影机清晰度高，画面均匀，色彩锐利，三片机可达到很高的亮度，且可随意变焦，调整十分方便。

使用 DMD 的投影显示器的基本构架如图 9-19 所示，由图可知，使用 DMD 的投影显示系统主要有以下几个组成部分。

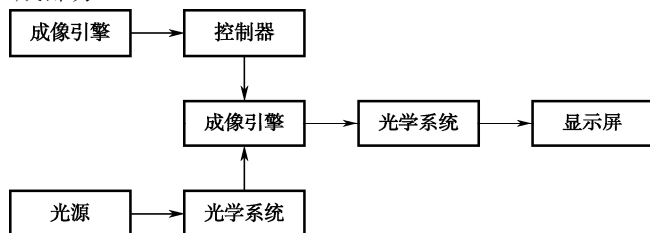


图 9-19 使用 DMD 的投影显示系统框图



- (1) 光源。采用 Philips 公司首创的超高压 (UHP) 弧光灯, 其功率一般在 100~200 W, 寿命一般在 3 000~6 000 h 之间。
- (2) 光学系统。采用椭圆形凹面镜, 其任务是将光源发出的光汇集集中到成像引擎中。成像引擎后的光学系统是利用一系列的微透镜, 将光源发出的高斯光束整理转变为亮度基本一致的均匀的矩形光。
- (3) 成像引擎。其作用是把图像信号转变为光学信号, 它涵盖了一系列用于生产适于作为计算机显示器的轻量级投影机的技术。DLP 投影成像技术, DMD 的微反射镜具有每秒切换 (开关) 1 000 次左右的能力, 通过控制该点切换次数的快慢可以决定该点所控制图像的灰度等级, 也就是说这些镜面每秒切换次数越快, 再现图像的层次就越丰富。目前单个镜面可以进行这样的工作大约 1 万亿个时钟周期, 也就是大约可以无故障地工作 20 年。这种技术的优势就在于具有极高的反应速度, 因为它使用了 DLP 芯片。
- (4) 显示屏幕及投影方式。显示屏幕实际上已经不是投影机内的部分, 但确是完整的投影显示系统必不可少的部分。屏幕投影方式分为前投影和背投影两种, 大多数投影机都采用前投影方式, 这同电影院放映模式一样。由于便携式投影机亮度非常高, 可不使用专用屏幕, 直接投在白色或浅色墙壁上即可; 背投影式的投影机位于半透明的屏幕之后, 而观众在屏幕的前方观看。显然, 它需要将输出的光线经处理反射到屏幕上, 很多大屏幕投影电视就是采用这种显示方法。

3. DLP 与其他常见投影显示技术的比较

随着经济技术的发展, 各种投影显示技术也逐步走向成熟和使用, 到目前为止, 根据成像原理的不同, 投影显示大致可分为 CRT 投影、LCD 投影、DLP 投影、LCOS 投影以及下一节要讲的 LV (光阀) 投影 5 种技术, 现将这几种投影显示技术做一比较, 如表 9-3 所示。

表 9-3 DLP 与其他几种投影显示技术的比较

种 类	工 作 原 理	优 点	缺 点
CRT 投影	通过红、绿、蓝三个阴极射线管的电子束轰击玻壳上涂的荧光物质发光成像, 经光学透镜放大后, 在投影屏或幕上会聚成一幅彩色图像	图像细腻、色彩还原性好、逼真自然、分辨率调整范围大、几何失真调整功能强	亮度低、亮度均匀性差、体积大、重、调整复杂、长时间显示静止画面会使管子灼伤
LCD 投影	透射式 LCD 投影机将光源发出的光分解成红、绿、蓝三色后, 射到一片液晶板的相应位置或各自对应的三片液晶板上, 经信号调制后的透射光合成为彩色光, 通过透镜成像并投射到屏幕上	体积小、质量轻、操作简单、成本低	光利用率低、像素感强
DLP 投影	由微镜的转动 ($\pm 10^\circ$) 控制调制光的反射方向, 即控制该点信号的通断, 然后通过透镜成像并投射到屏幕上	光利用率高、色彩丰富、响应速度快、亮度和色均匀性好、体积小、质量轻	
LCOS 投影	将透射式电极转换成反射膜, 调制光经液晶反射后, 通过透镜投射到屏幕上	控制电路不影响亮度, 提高了光的利用率	

续表

种 类	工 作 原 理	优 点	缺 点
光 阀 (LV) 投影	根据寻址技术、光阀及上述两者之间所用的转换介质的不同可以分成许多种类,目前市场上常见的是由CRT、转换器和液晶光阀组成的大型光阀投影机。它使用高清晰度 CRT 做像源,经转换后通过光阀成像	分辨率高、没有像素结构、亮度高,可用于光线明亮的环境和超大屏幕显示	成本高、体积大、质量重、维护困难

9.2.3 光阀投影显示技术

光阀 (Light Valve, LV) 是一种在光路中起通断光路并对光路强行进行调制和放大的应用光电子器件。在投影显示技术中,光阀相当于一个图像亮度增强器,它利用微弱的图像信号输入改变器件的电光性能(如偏振、折射率等)或几何微结构特性。外部读出光被光阀(反射或透射)作用后,再经投影物镜投影,最后在投影屏幕上得到与微弱输入图像结构相同,但强度和尺寸已得到增强放大的图像。

按照光阀的上述定义,光阀的基本结构由控制界面、变性/变形单元及相应附件组成。根据变性/变形材料性质,光阀可分为以下几类。

- 变形介质膜光阀: 油膜光阀、压电陶瓷光阀、热塑光阀、弹性体光阀。
- 电光晶体光阀。
- 铁电陶瓷光阀。
- 液晶光阀。
- 变形金属膜光阀: DMD 光阀、镜振光阀、槽缝式光阀、栅状光阀。

目前商业化应用的投影显示光阀,主要有数字微镜器件(DMD)光阀、液晶光阀(LCLV)和油膜光阀(OFLV)。DMD 投影显示技术在前面已做了介绍,液晶光阀投影技术是主流技术之一,这里将对其结构、原理、应用及相关技术进行描述。

1. 液晶光阀的结构与工作原理

液晶光阀投影技术是一种比较成熟的光阀投影技术,具有亮度高、色泽好的特点,加之良好的经济性能,使其在民用投影系统中得到广泛应用。液晶光阀器件利用液晶的扭曲(或超扭曲)向列效应对入射光(不是信号光)进行调制,实现对信号光的放大,得到高清晰度、大容量的信息输出。

(1) 液晶光阀的结构。反射式液晶光阀的基本结构如图 9-20 所示,图中使用高清晰度的 CRT 作为图像信号源(也有使用 LCD 或其他显示器的)。由图 9-20 从右至左的顺序,液晶光阀的构成单元是:

① 光纤导光面板。它由数以亿根像素光纤热压而成,图像可以从一端无失真地传输到另一端,且面板可保证良好的气密性。其主要作用是,补偿输入图像的场曲、消除像散,保证图像满足分辨率的要求。

② 透明电极。透明电极是一种 ITO 导电膜,两导电膜间加有一个数伏的直流驱动电压。

③ 光电导体层。光电导体层是由很薄的光电材料(如 CdS)组成的光敏层。当有光照时,光敏层阻抗迅速下降,成为良导体,否则阻抗很高,呈现绝缘体特征。利用该特征,可使上述驱动电压根据光信号变化,实现液晶层的光调制作用。

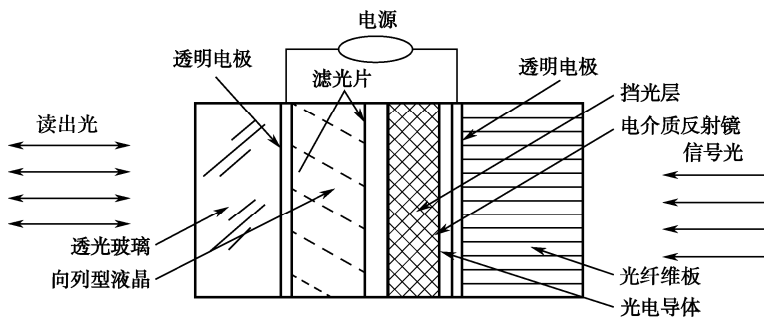


图 9-20 液晶光阀结构示意图

④ 挡光层和反射膜。挡光层实现信号光和读出光的隔离，以消除相互之间的干扰，而在其前面有反射读出光的介质高反射膜。

⑤ 液晶层。液晶层是一层厚度特别设计的液晶（如 TN 或 STN 液晶）。该液晶层基于电光双折射和偏振原理，在驱动电压作用下，液晶分子能做 45° 扭曲。液晶层两边分别设有偏振片和检偏振片，读出光强经过时，将随液晶层两端施加电场变化而变化，此即为液晶的光调制作用。此外，液晶层两边还设有匹配滤光片，以滤掉非期望波长的光。

由图 9-20 还可知，液晶光阀结构的主要单元实际上由两部分组成：即由光导层、光阻层组成的光敏层；由透明电极、液晶层、电介质反射镜组成的反射光调制层。

（2）液晶光阀的工作原理。由 9.1.1 节可知，对于向列型液晶，其分子排列取向有序，分子长轴近似平行，没有信号光或加在液晶层两边的平均电压值小于其电控双折射效应的阈值，光导层处于高阻状态，这样液晶仅显示出扭曲效应。此时，入射线偏振光读出光垂直通过液晶，再经过介质反射镜反射出来时，线偏振光经过检偏器（或偏振滤光片）时被阻挡，相应的视场就呈现暗态；而当有信号光作用于光导层时，光导层呈现低阻态，电压经阻光层直接加在液晶单元上，液晶分子排列在垂直于电场方向产生变化。电压足够大时，出射光相当于入射光的偏振方向附加旋转 90° ，相应的视场为亮态，当电压介于开启和关闭之间时，即可实现亮度调制。

根据上述原理，当写入信号光是呈一定亮度分布的图像时，相应的液晶透射率便与图像亮度相对应，当使用强光照射液晶层时，可得到与信号光亮度分布相同但强度已增强的图像，该图像经投影物镜投射在投影屏上，从而实现大屏幕投影。

2. 液晶光阀投影显示系统

液晶光阀投影机是 CRT 投影机与液晶光阀相结合的产物，它采用 CRT 管和液晶光阀作为成像器件，信号光与投影光相分离，只要信号光的图像分辨率足够高，即使亮度不高，也可获得高亮度、高清晰度的投影画面。它很好地解决了传统 CRT 大屏幕投影显示时图像分辨率与亮度间的矛盾。由于投影光源采用外光源，也称为被动式投影方式。

目前，液晶光阀投影和 DMD（称为 DLP）投影技术都是大屏幕投影显示的主流技术。液晶光阀大屏幕投影系统主要由 3 部分组成：光源（一般使用高亮度的高压汞灯）、液晶光阀与 CRT 组元、投影物镜光路系统。

液晶光阀投影系统光路，它主要由聚光镜、分光板与投影物镜等组成，如图 9-21 所示。

在液晶光阀大屏幕投影系统中，液晶光阀起可控光开关作用。高清晰度 CRT 输出的图像信号，经像素光纤板传至液晶光阀的光敏层上，两个透明电极上的直流电压经光敏层后形成与



图像信号对应的分布电场，并加在液晶层的两边。使用外光源产生的准直强光束，通过液晶层并由内部的介质镜反射，再次通过液晶层射向投影物镜，投影物镜将其投射在屏幕上，从而获得强度和尺寸得到放大的与信号相似的图像。

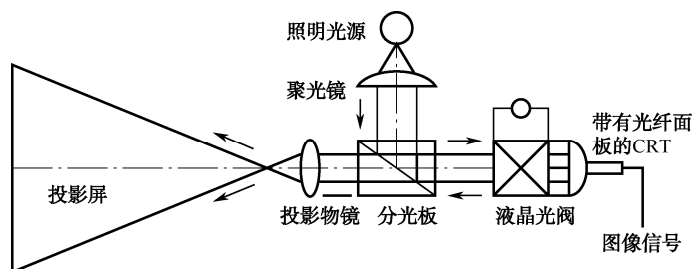


图 9-21 液晶光阀投影系统光路

液晶光阀还设计有特定的滤光片，以滤去其他方向的光线（或不需要的色光）。由于液晶光阀投影是目前亮度、分辨率最高的投影技术之一，因而适用于环境光较强、面积较大的投影显示场合，目前广泛用于控制中心、电教中心、会议演示中心和各类民用场所。

3. 液晶光阀投影与其他投影系统比较

液晶光阀投影系统与其他几种投影系统的比较，如表 9-4 所示。

表 9-4 LCLV 投影系统同其他投影系统比较

指 标	液晶光阀投影机	CRT 投影机	液晶投影机	DLP 投影机
亮度	最高	高	高	高
视频分辨率	高	高	一般	高
对比度	好	好	一般	好
RGB 频宽	较宽	宽	较宽	宽
色彩	好	较好	好	好
使用维护	较好	好	一般	较好
价格	较高	低	低	高
体积	较大	大	小	较小
适用环境	强光环境，会议中心	固定场所，会议中心	便携，小会议室	便携，小会议室
生产厂商 (品牌)	休斯、JVC、Barco、 Ampro	ECP、NEC、SONY、 Barco	NEC、EPSON、 SHARP、HITACHI	ECP、PROXIMA

目前液晶光阀投影系统的图像写入器件除了 CRT 管外，也可以是液晶板。后者可以实现小型化，使系统结构更加紧凑，但原理上没有本质差别：在图像写入元件前都有一个固态图像光放大器（光阀），图像再经过光学镜头形成超高亮度、超高对比度、超高分辨率的高质量画面。

带有 CRT 管的液晶光阀投影技术，是目前大屏幕投影影像质量最高的一种投影技术。但存在体积较大、价格偏高和结构复杂不易维修的缺点。

9.2.4 激光投影显示技术

激光投影显示技术（激光投影电视）即激光无拼接大屏幕显示技术，它充分地利用了激光本身的优点，是新的激光图像再现技术。在光的传播方式上，激光光源与传统的白炽灯、卤化物灯有着本质上的不同：普通白炽灯、卤化物灯的光线向所有方向发射，而激光器将所有的光线都聚集在一个平行的光束中，并且它比传统投影电视能够表达更大的颜色范围，提供更加清晰的图像。

激光投影电视放映系统的不同之处在于，无论激光以垂直或水平角度照射银幕，效果都是一样的，即没有失真。即使是怪异的投影几何结构，如一个拱形银幕，甚至一个圆形屏幕，激光投影在任何地方都不会产生模糊不清的现象。激光投影电视的这种特性为环形放映开创了一个美好的前景。

与传统投影电视中的卤化物灯相比，激光是一种非常高效的光源。在传统投影电视中，卤化物灯只将光线能量的一小部分（2%~3%）进行转化，其余的都变成热能浪费了，而且卤化物灯价格昂贵、易损耗、亮度衰减迅速、对震动非常敏感，而激光投影电视系统的机械部件很少，激光束可以通过镜面进行偏转，系统稳定性好。

当前，投影式激光显示即微显示投影机，由于采用激光光源，因而激光显示具有色域宽、色纯度高、亮度高、节约资源、节省能源、优化环境、显示画面尺寸灵活可变、无有害电磁射线辐射、能够实现不用眼镜的真三维显示等优点。因此，激光显示技术是新型显示技术，是一种具有前瞻性的显示技术，所以国家将激光显示列入“十二五”规划，特别是国家“十二五”科学技术规划，在新一代信息技术中将激光显示列为新型显示首位加以发展，是非常必要而具有战略意义的。

1. 激光显示系统工作原理

激光显示系统工作原理如图 9-22 所示，由图可知，它主要由三基色激光光源、光学引擎和屏幕三部分组成，其中，光学引擎则主要由红绿蓝三色光阀、合束 X 棱镜、投影镜头和驱动光阀组成。红、绿、蓝三色激光分别经过扩束、匀场、消相干后入射到对应的光阀上，光阀上加有图像调制信号，经调制后的三色激光由 X 棱镜合色后入射到投影物镜，最后经投影物镜投射到屏幕，就可得到激光全色显示图像。

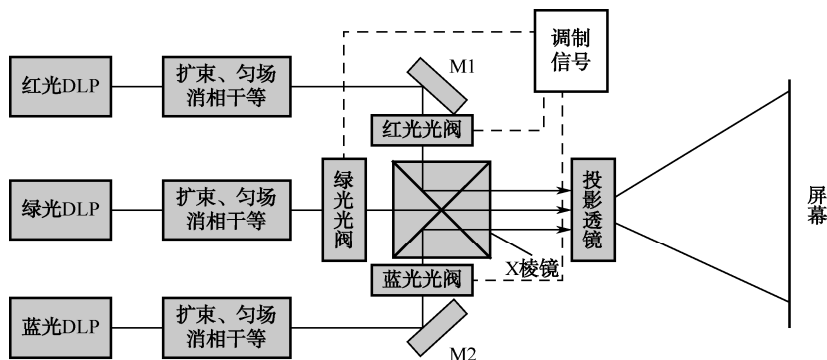


图 9-22 激光显示系统工作原理



由于激光显示技术是以高饱和度的红、绿、蓝（RGB）三基色激光为光源的显示技术，它充分利用激光波长可选择性和高光谱亮度的特点，使显示图像具有更大的色域表现空间，色域覆盖率可达 90%（人眼所能看到的色域中，液晶只能再现 27%，等离子为 32%，而激光的理论值超过 90%），可实现 2 倍于传统光源的色彩再现能力，色彩饱和度为传统显示的 100 倍以上。因此，它最大限度地能展现人眼可以识别的色彩，真实地再现客观世界丰富、艳丽的色彩，提供更具震撼的表现力。同时，它完全继承数字时代的高分辨率、数字信号等特征，实现人类有史以来最完美的色彩还原，激光显示将成为下一代显示即大色域全色显示时代的主流技术。

在应用层面，激光显示技术将成为未来高端显示的主流，在公共信息大屏幕、激光电视、数码影院、手机投影显示、便携式投影显示、大屏幕指挥及个性化头盔显示系统等领域具有很大的发展空间和广阔的市场应用前景。可在超大屏幕展现更逼真、更绚丽的动态图像，实现其他显示技术所不能达到的视觉震撼效果。

2. 激光显示技术的特点

由于激光显示技术是利用半导体泵浦固态激光工作物质，产生红、绿、蓝三种波长的连续激光作为彩色激光显示的光源，通过控制三基色激光光源在 DMD 芯片上反射成像。激光光源显示技术与传统光源显示技术相比，具有如下优势与特点。

（1）激光显示技术节能减排绿色环保。显示技术正进行着一场新的革命，环保节能已经成为了全球各国政府共同的使命，同时环保节能理念日益成为国家与国家、企业与企业生产制造能力竞争的重要手段之一。激光显示作为新一代的节能显示技术具有卓越的低能耗特点。以 1 000 万台 LED 电视每天工作 4 小时计算，年耗电共计 29 亿度，如果这些家庭采用更节能的激光电视每年将节电 20 亿度，近于几个大型火力发电厂年发电量的总和，相当于每年减少 173 万吨二氧化碳的排放。同时，激光显示无有害电磁射线辐射，其核心部件在生产过程中不使用任何重金属，没有废水、废气、废物排放，是名副其实的环境友好型绿色环保光源。因此，激光显示技术能节约资源、节省能源、优化环境，非常具有发展前景，是投影显示技术的发展方向。

（2）激光显示具有色域宽、色纯度高，能真实再现客观世界的色彩。激光是 100% 单色光，激光投影显示红、绿、蓝三色光分别调制，屏幕显示彩色鲜艳纯正。它所显示的图像具有更大的色域表现空间，色域覆盖率可达 90%（而液晶仅只能再现 27%，等离子也只为 32%），能实现 2 倍于传统光源的色彩再现能力，其色彩饱和度为传统显示的 100 倍以上，可最大限度地能展现人眼可以识别的色彩，真实地再现客观世界丰富、艳丽的色彩。因此，激光显示将成为大色域全色显示时代的主流技术。

（3）激光显示亮度高，稳定可靠，不受视角的方向性影响。由于激光本身的特点，既能增加显示亮度，并大幅提高画面色彩和亮度的均匀性、一致性，又能增强图像的层次感。激光显示大屏幕的亮度，比 LED 拼接大屏幕还亮，且稳定可靠，不受视角的方向性影响。它所显示的鲜艳靓丽的画面，能带给人们不同凡响的视觉冲击。

（4）激光显示画面尺寸灵活可变，并可投射到各种材料表面，甚至弯曲表面。激光显示画面尺寸灵活可变，并可投射到各种材料表面，甚至弯曲表面，能实现图像的完整、无失真的显示。如投射在玻璃上，所显示的图像也具有高对比度，且不受外部光线影响，白天夜间与任意角度均可见。我国苏州巨像科技有限公司就开发了这种激光投影仪，安装位置灵活，不仅适用于超市、商店玻璃橱窗、餐饮娱乐场所的玻璃墙面及玻璃屏风，而且适合在任何亮点环境下使

用,可以有效地应用于专卖店橱窗、酒吧、咖啡厅、汽车 4S 店、展会展厅等地点的广告展示和品牌宣传。

(5) 激光大屏幕实现真无缝,可适应所有大屏幕标准,且投影距离短,使用寿命超长。激光显示大屏幕实现真无缝,彻底消除图像边缘的物理拼缝,实现图像的完整一体化、无失真、多通道无缝拼接。激光无拼接大屏幕显示系统能为我们呈现出没有任何割裂感觉的整幅画面,能给人们完美的视觉享受。其更高的分辨率在提高清晰度的同时,使人们感受到细微显示的魅力。这种系统还可适应目前使用的所有大屏幕标准,即 PAL 制、NTSC 制、SECAM 制 VGA 或高清晰度大屏幕。

激光显示大屏幕投影距离短,它可以在不足 1 m 的距离内投射出上百英寸的画面,从而大大提高了空间利用率,减少了使用成本,并且它的使用寿命超长,其室温寿命一般可达 10 万小时,经高温老化试验推算出的室温寿命可达百万小时,可连续长时间不间断开机,可做到 8 年无须更换光源。

(6) 激光显示可多用户同时与机器交互,能实现不用眼镜的真三维显示。激光投影显示技术可做到多个用户同时与机器交互,每个用户可以用多个手指操作屏幕。如神州服联技术服务(北京)有限公司的激光投影显示系统,可允许用户在屏幕的多个位置同时输入,而代替了鼠标的功能。更重要的是,该系统还可以识别手指的姿态,如可以用两个手指缩放一幅图像,用一根手指移动物体,还可以产生“捏”的效果等。显然,利用激光光源的投影显示技术,能实现不用眼镜的真三维显示,是图像显示技术的发展方向。

3. 激光大屏幕显示技术的应用

由于激光投影显示技术具有的独特优势,因而它在公共信息大屏幕、激光电视、数码影院、手机投影显示、便携式投影显示、大屏幕指挥及个性化头盔显示系统等领域具有很大的发展空间和广阔的市场应用前景。因为它可在超大屏幕展现更逼真、更绚丽的动态图像,实现其他显示技术所不能达到的视觉震撼效果。

一般,追求亮丽的超大画面、纯真的色彩、高分辨率的显示效果,历来是人们对视觉感受的一种潜在要求。这大到指挥监控中心、网管中心的建立,小到视频会议、学术报告、技术讲座和多功能会议的进行,都是对大画面、多色彩、高亮度、高分辨率显示效果的渴望越来越强烈,而传统的监控电视墙、投影硬拼接屏和箱体拼接墙等,都很难满足人们在这方面的要求。目前,激光无拼接大屏幕投影显示技术,正在逐步成为适应这一需求的有效途径。这种激光无拼接大屏幕投影显示技术一般用于虚拟仿真、系统控制和科学研究,近来开始向展览展示、工业设计、教育培训、会议中心、指挥监控、会议调度、展览宣传、立体动感影院、环幕电影、球幕展示、虚拟仿真、大视野大视角合成军事演练等专业领域发展。显然,激光无拼接大屏幕投影显示技术将成为未来高端显示的主流。

由于激光显示技术是新型显示技术,是一种具有前瞻性的显示技术,我国将激光显示技术早已列入“十二五”规划,特别是国家“十二五”科学技术规划,并在新一代信息技术中将激光显示列为新型显示首位加以发展,因而现在我国激光显示技术总体水平已与国际同步,激光显示大屏产品也已投放市场。2002 年 9 月,在国内首次实现全固态激光全色显示,目前已研制出 60 英寸激光家庭影院、84 英寸及 140 英寸大屏幕激光显示样机;并且,在 2006 年 5 月研制成功 200 英寸大屏幕激光显示工程样机,形成的色域国际最大,可显示世界上最丰富的色彩,具有自主知识产权。我国激光显示技术多项成果达到国际领先、先进水平,在晶体材料、全固



态三基色激光、激光显示等关键器件和技术方面均有自己的专利保护。

中国激光显示产品与国际产品的参数比较如表 9-5 所示。

表 9-5 中国激光显示产品与国际产品的参数比较

单 位	红光/nm	绿光/nm	蓝光/nm	色域 (%NTSC)	覆盖率/%
中国	669	515	440	253.4	79.2
日本 SONY	642	532	457	214.4	67.0
德国 LDT	628	532	446	209.4	65.4
美国 LPC	656	532	457	221.7	69.3
美国 Q-peak	628	524	449	215.5	67.3
瑞士 ETH	603	515	450	169.0	54.8

9.3 3D 立体显示技术

我们生活在三维的立体世界中，然而呈现在人眼（单个的左眼或右眼）视网膜上的图像却是二维图像，这些二维图像在经过人脑复杂的融合反应后，最终可呈现出三维图像。

三维立体显示作为当今世界各国大力发展的下一代新型显示技术，正逐渐成为一个引人注目的前沿科技领域。近年来，立体显示技术在电视广播、视频游戏、医疗、教育等领域的应用越来越多，三维显示已从电影银幕向电视终端、计算机终端、智能手机终端、平板电脑终端等发展。

目前，主流的三维显示已经占据了大半壁江山，已知的三维显示设备包括有立体视觉、头盔式显示器、CAVE、裸眼立体显示器和真三维显示等。

主要的 3D 立体显示技术有如下几种。

9.3.1 眼镜 3D 立体显示技术

眼镜式 3D 技术，我们又可以细分出三种主要的类型：色差式、偏光式和主动快门式，也就是平常所说的色分法、光分法和时分法。

1. 色差式 3D 技术 (Anaglyphic3D)

色差式眼镜 3D 立体显示技术的原理如图 9-23 所示，主要配合使用的是被动式红-蓝（或红-绿、红-青）滤色 3D 眼镜。色差式 3D 先由旋转的滤光轮分出光谱信息，使用不同颜色的滤光片进行画面滤光，使得一个图片能产生出两幅图像，人的每只眼睛都看见不同的图像，再经过大脑合成为立体影像。

这种技术历史最为悠久，成像原理简单，实现成本相当低廉，眼镜成本很低，但这种方法容易使画面边缘产生偏色，3D 画面效果也是最差的。

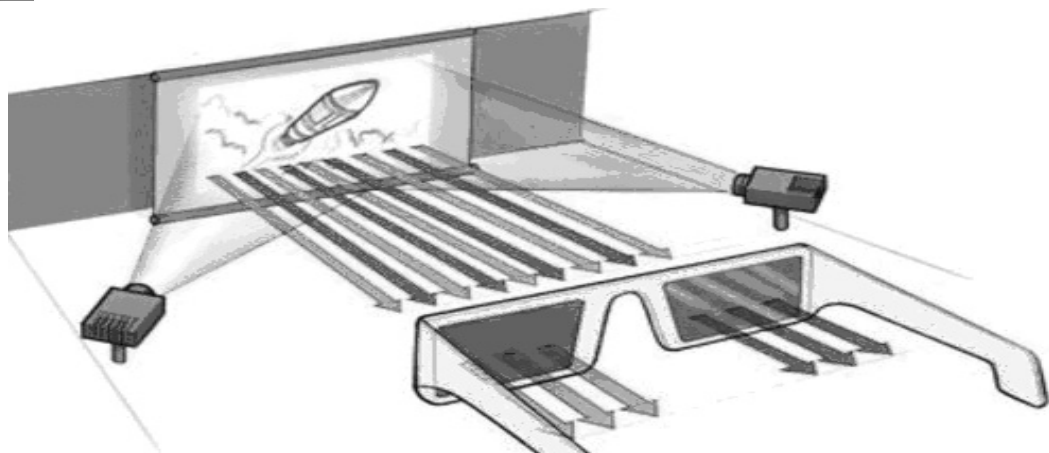


图 9-23 色差式眼镜 3D 立体显示技术的原理

2. 偏光式 3D 技术 (Polarization 3D)

偏光式眼镜 3D 立体显示技术, 也叫作偏振式 3D 技术, 配合使用的是被动式偏光眼镜, 又称被动式 3D 眼镜 (Passive 3D Glasses) 技术。偏光式 3D 是利用光线有“振动方向”的原理来分解原始图像的, 先通过把图像分为垂直向偏振光和水平向偏振光两组画面, 然后 3D 眼镜左右分别采用不同偏振方向的偏光镜片, 这样人的左右眼就能接收两组画面, 再经过大脑合成立体影像, 如图 9-24 所示。具体地说, 它是在 TV/Monitor 前面贴上一层微偏光膜 (Micro-retarder), 利用光的偏振方向将左眼与右眼的影像分离, 当观赏者戴上偏光眼镜时, 即可正确地分别看到左、右眼画面而产生 3D 效果。

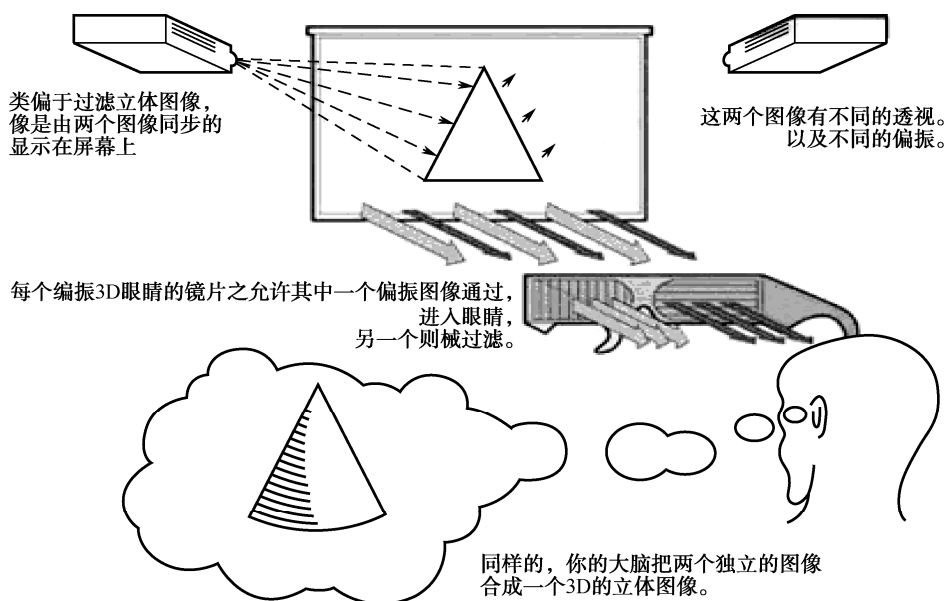


图 9-24 偏光式眼镜 3D 立体显示技术应用示例

偏光式 3D 技术的优点是图像效果比色差式好, 而且眼镜成本也不高, 比较多电影院采用



的也是该类技术。但是,由于偏光 3D 技术采用的是分光法成像原理,会使画面分辨率减半,从而难以实现真正的全高清 3D 影像,并且还降低了画面的亮度。因此,偏光式 3D 技术对显示器的亮度要求较高,且需达到 240 Hz 的刷新频率。目前,应用较多的没有闪烁的所谓不闪式就是偏光式的一种。市场上以乐金(LG)3D 电视,宏碁(Acer)、联想(Lenovo)笔记本电脑采用了这种偏光式眼镜 3D 立体显示技术。

3. 快门式 3D 技术 (ActiveShutter3D)

快门式眼镜 3D 立体显示技术如图 9-25 所示,它又称为主动式 3D 眼镜技术(Active 3D Glasses),主要配合主动式快门 3D 眼镜使用。这种 3D 显示器以高达 120~240 Hz 的银幕刷新频率,连续性的交叉显示左、右眼的画面;借由快门眼镜快速切换、遮蔽左右眼,使左右眼各自看到正确的左右眼画面,在大脑内呈现出具有深度感的立体影像。

快门式眼镜 3D 立体显示技术的优点是不会牺牲 3D 画面解析度且立体效果良好,在电视和投影机上面应用得最为广泛,资源相对较多,而且图像效果出色,受到很多厂商推崇和采用。但是,少数人观看主动式 3D 眼镜的显示会有头晕不舒服的情况,且其匹配的 3D 眼镜价格较高。

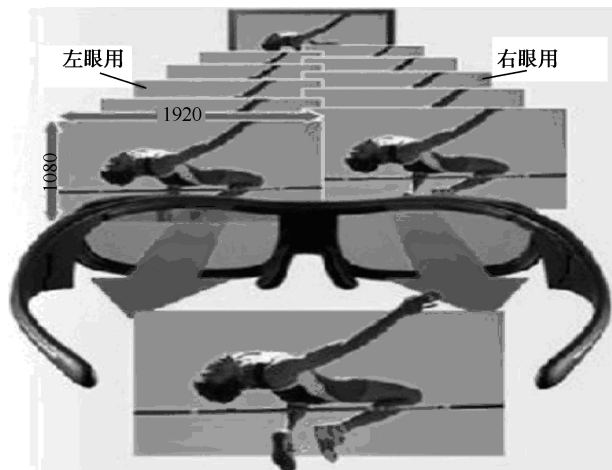


图 9-25 快门式眼镜 3D 立体显示技术

目前,三星(Samsung)、Panasonic、Sony Bravia 等 3D 电视、NVIDIA 3D Vision,以及 3D Vision2 等产品均使用这种主动快门式眼镜 3D 立体显示技术。

9.3.2 裸眼 3D 立体显示技术

裸眼 3D 显示器,由 3D 立体现实终端、播放软件、制作软件、应用技术四部分组成,是集光学、摄影、电子计算机,自动控制、软件、3D 动画制作等现代高科技技术于一体的交差立体现实系统。因此,裸眼 3D 显示技术是影像行业最新、前沿的高新技术,它的出现改变了传统平面图像给人们带来的视觉疲惫,也是图像制作领域的一场技术革命,是一次质的变化,它以新特奇的表现手法,强烈的视觉冲击力,良好优美的环境感染力,吸引着人们的目光。裸眼 3D 技术目前有:

(1) 全像投影式 (Holographic)。全像投影式裸眼 3D 立体显示技术, 是利用红、绿、蓝 3 色激光光源各自经过调变器产生相位型光栅, 激光在经过全像片合并之后, 以垂直扫描镜及多面镜进行垂直及水平的扫描, 从而使立体影像呈现出来。

例如, 2014 年 5 月 Billboard 音乐颁奖现场, 就是利用这种全像投影技术, 让已逝的摇滚巨星麦克·杰克逊, 活生生的重现于现场观众与世人面前。

(2) 体积式 (Volumetric)。体积式裸眼 3D 立体显示技术, 是由德仪所开发的激光 3D 投影技术。它是以激光光源照射在一个高速旋转盘上的散射现象, 于一个玻璃密闭空间内显示立体物件的每一个点, 并组成立体影像。但其缺点在于投影物件体积受到限制, 且越靠近中央转轴解析度越低。

(3) 视差光栅 (Parallax Barrier)。视差光栅裸眼 3D 立体显示技术, 是利用透光栅栏来控制左右眼画面的光线前进、折射方向, 从而呈现出立体影像的。其优点是成本较低, 但有亮度与可观视角/点数限制, 且显示 2D 文字时较不清晰。

2013 年, 分别有飞利浦、友达、东芝、京东方等开发出具备 9 个视点 55 寸显示电视/面板。目前, 它已为 LG Optimus 3D、HTC Evo 3D 等智慧手机, 任天堂 3DS 游戏器与佳的美 (Gadmei) 裸眼 3D 平板所采用。

(4) 柱状透镜 (Lenticular; LC)。柱状透镜技术也被称为微柱透镜 3D 技术, 它利用液晶分子因通电的扭转使光线通过时造成折射现象, 以形成垂直柱状透镜的聚焦效果。其原理是在液晶显示屏的前面加上一层柱状透镜, 使液晶屏的像平面位于透镜的焦平面上, 从而可使每个柱透镜下面的图像的像素被分成几个子像素。这样, 透镜就能以不同的方向投影每个子像素, 于是双眼从不同的角度观看显示屏, 就能看到不同的子像素, 呈现出立体影像。

柱状透镜裸眼 3D 立体显示技术最大的优势便是其亮度不会受到影响, 即亮度高; 若搭配摄影镜头追踪观赏者还可以做到全视角, 但相对成本偏高。

采用该技术的代表厂商有欧洲的飞利浦、中国重庆的卓美华视等。友达光电公司于 2011~2012 年也展示过柱状透镜技术搭配摄影机的全视角裸眼 3D 显示面板。而东芝的 Qosmio F750、F855, 华硕 (ASUS) ROG G53SX 等笔记本电脑也使用柱状透镜的裸眼 3D 面板技术。

(5) 分时多工 (Time-Multiplexed)。分时多工裸眼 3D 立体显示技术又称为指向背光板 (Directional Backlight) 技术, 它是以一组指向性背光板搭配快速反应面板, 来快速切换显示左、右眼影像, 从而让使用者观看以形成 3D 影像的。

目前, 3M 掌握该技术的相关专利, 并曾开发出 10 英寸中小尺寸显示面板, 它能够在不减低光源、色泽与亮度的情况下, 达到某个范围视角内裸眼 3D 的立体显示效果。

9.3.3 真 3D 立体显示技术

在裸眼 3D 显示技术基础上, 现又提出一种真 3D 立体显示技术, 因为人类发展显示技术追求的终极目标是在观察三维影像时, 犹如在观察一个真实存在的物体, 完全满足人类对真实场景的三维视觉体验, 即真 3D 立体显示技术。因此, 相对于当下主流的基于双目视差深度暗示的三维显示技术, 真三维显示技术不会造成观看者的视觉疲劳, 其显示的图像更加真实, 更符合人们的视觉习惯。

目前, 被列为真三维立体显示技术的有以下几种。

1. 体三维显示技术

体三维显示技术是一种基于多种深度暗示的真三维显示技术,其通过特殊方式来激励位于透明显示空间内的物质,利用光的产生、吸收或散射形成体素,并由许多分散体素构成三维图像,或采用二维显示屏旋转或层叠而形成三维图像。由此形成的三维图像如同真实的物体,能满足人的几乎所有生理和心理的深度暗示,可供多人多角度裸视观看,符合人们在视觉观看及深度感知方面的习惯,所以是一种真三维显示技术。

具体地说,体三维显示是通过二维图像在空间不同位置的叠加,产生三维空间发光点的分布,从而实现三维显示。该方法可以通过二维平面图像的空间扫描或通过静态的多层平面显示器(如液晶显示面板)的叠合产生体像素分布,由此,体三维显示主要有三种实现方式:动态屏、上转换发光和层屏显示技术,现分述如下。

(1) 基于动态屏的体三维显示。基于动态屏的体三维显示,依靠机械装置旋转或移动平面显示屏,利用人眼的视觉暂留效应实现空间立体显示效果。

(2) 基于上转换发光的体三维显示。基于上转换发光的体三维显示,使用两束不同波长的不可见光束来扫描和激励位于透明体积内的光学活性介质,在光束的交汇处取得双频两步上转换效应而产生可见光荧光,从而实现空间三维图像的显示。

(3) 基于层屏的体三维显示。基于层屏的体三维显示,使用高速投影机将待显示物体的深度截面,连续投射到与显示体相对应的深度位置上,且保证在较短时间(如 $1/24\text{ s}$)内完成在显示体上的投影成像,其中显示体是由距离观看者远近不同的层屏组成的。利用人眼的视觉暂留效应,观看者可在显示体前方任意位置观看到三维图像。

扫描型体三维显示技术如图 9-26 所示,其原理是通过平面屏幕绕中心旋转,构建出一个圆柱形空间三维显示。

静态体的三维显示技术如图 9-27 所示,其原理是通过高速投影机把图像投射在层状分布的投影屏幕上,从而形成空间发光点分布。

由上可见,体三维显示是采用基于重构物体原光点方式,得到的图像是在相应位置真实存在的图像。图像具备运动视差的特性,适于全视场观看,观察者数量也不受限制。因此,这种方式的三维显示效果较好,缺点是所有的显示点都能被看到,不具备空间遮挡关系,无法显示物体的表面纹理。

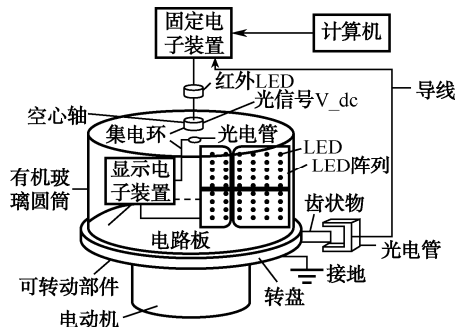


图 9-26 扫描型体三维显示技术

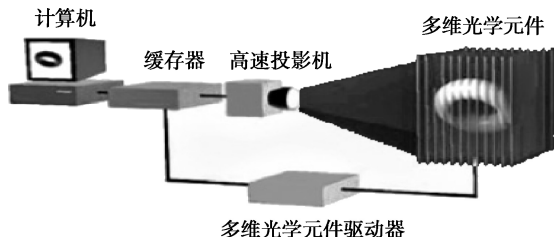


图 9-27 静态体三维显示技术

2. 光场三维显示技术

(1) 光场三维显示技术的基本原理。任何物体,不论是自行发光,还是漫射/反射周边其他光源的光,都会在该物体的周围形成自己独特的光场分布,如图9-28所示。

如果能够构建这样一个可进行三维显示的屏幕,它可以重建物体发出的光场(即它的出射光线分布与之前的物体是相同的),而人眼会自发地逆向追踪光线,使得观察者依然可以感受到这个三维物体的存在。这就是空间光场三维显示技术的基本原理,如图9-29所示。

综上,光场三维显示就是在空中再现三维物体的发光光场分布,从而再现三维景象。由于光场包含了物体发光的光线方向,因此具有空间遮挡效应,可以很好地克服传统三维显示的缺点。

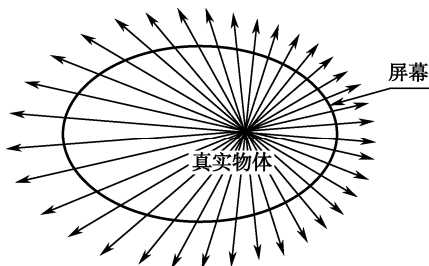


图 9-28 物体发光的光场

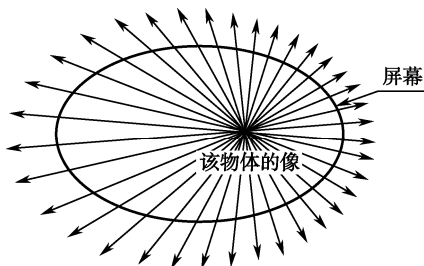


图 9-29 由可三维显示的屏幕所构建的光场

(2) 光场三维显示的技术实现。光场三维显示既可以通过高速投影机,以及屏幕的 360° 扫描实现,也可以利用投影阵列通过三维光场的空间拼接实现。

通过高速投影机以及屏幕的 360° 扫描实现光场三维显示的原理如图9-30所示,图中高速投影机投影出不同方向的光线,通过屏幕的旋转,构造出任意方向的光线分布。利用投影阵列通过三维光场的空间拼接实现光场三维显示的原理如图9-31所示,图中投影机投射不同方向的光线,发光点A或B的光线由不同投影机提供,当投影机足够密时,就可以构造出空间的三维图像。

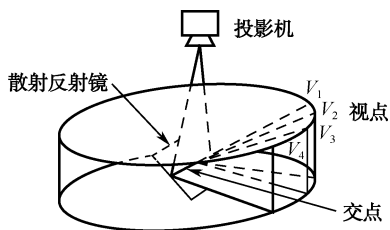


图 9-30 通过高速投影机以及屏幕的 360° 扫描实现光场三维显示的原理

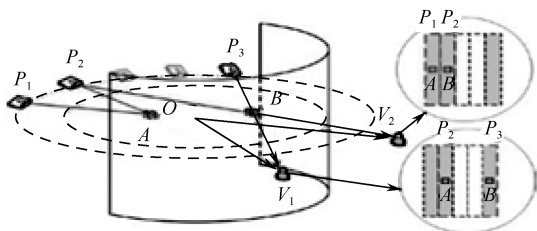


图 9-31 利用投影阵列通过三维光场的空间拼接实现光场三维显示的原理



在光场三维显示中,由于显示的图像和显示的硬件重叠在一起,所以无法实现三维显示场景的悬浮和可探入性。但是,在三维显示的应用中,下面要介绍的基于光场扫描的 360° 可探入悬浮三维显示系统,就可以增强显示的交互性,从而扩大应用的范围。

(3) 基于光场扫描的 360° 可探入悬浮三维显示系统。基于光场扫描的 360° 可探入悬浮三维显示系统,是一种典型的光场三维显示技术,它可以增强显示的交互性,扩大应用的范围。基于光场扫描的 360° 可探入悬浮三维显示系统的结构如图9-32所示,它可通过特殊的反射屏幕,把光场反射到屏幕的上方,通过高帧频投影机和屏幕的扫描构建出悬浮于屏幕上方的三维显示,图中高速投影机置于系统上方。

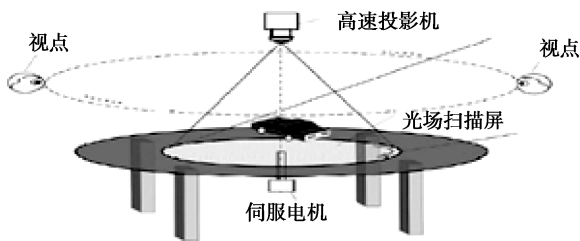


图9-32 基于光场扫描的 360° 可探入悬浮三维显示系统的结构

基于光场扫描的 360° 可探入悬浮三维显示系统中光场扫描屏的结构如图9-33所示,由图可见,扫描屏是一个圆形的反射式定向散射屏。散射屏上的微结构可以使入射光向观察者所在区域偏折,并且在竖直方向上以较大的角度散射,而在水平方向上保持光线方向不变。高速投影机将事先处理过的光场图像同步地投射到高速旋转的光场扫描屏上,经过屏幕转折和散射,重建出 360° 可视的三维光场,并在屏幕上方呈现出 360° 可视的悬浮三维物体。

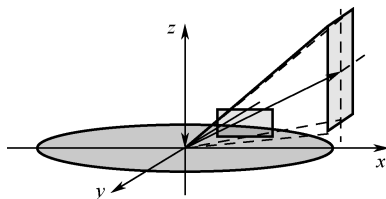


图9-33 基于光场扫描的 360° 可探入悬浮三维显示系统中光场扫描屏的结构

光场绘制技术在计算机图形学领域是一种基于图像的绘制方法,它通过对预采集的场景图像进行组合采集,得到新的任意视点位置的图像。预采集的图像可以是绘制的也可以是实拍的大量图像,设计者通过这些图像重建光场。光场建立后,可以通过查找、插值和组合等方式提取出正确的光场切片,并实时重建出新的不同位置的视角图像。然后,通过再现采样的三维光场,使观察者自然地获取正确的 360° 视角的图像。

其具体方法是:通过绘制或者实拍的一系列图像来得到多组照片序列(这些拍摄所得的照片即为场景光场的切片),然后对三维光场进行预处理,得到适合投影的图像。在确定了视点位置后,从三维光场中查找到该点的辐射度,即从已经获取的该视点位置所拍摄的图像上查找对应的像素值,当预先获取的光场切片数量足够多时,可以从已获取的切片内精确得到或通过相邻视点的视图近似得到各视点视图。像素级别的映射可以确保重构的光场点云足够密集,只不过数据量会十分庞大。

此外,可探入性是基于光场重建的 360° 可探入悬浮三维显示系统的亮点,利用此特性,人

们就可以通过一系列的手势或动作,实现更加直观、犹如身临其境般的人机交互应用。这种效果一般是通过摄像头或体感交互器件(如微软公司的 Kinect 等)抓取并分析人的手势动作,主机再根据动作的含义来改变投影机输出的图像实现的。

为了确保输出的三维影像可以流畅地变化,需要投影机能够快速更换图像,即要求计算机快速地绘制图像。这里依然会采用图形处理器进行并行运算来提高速度。在对速度要求更高的场合,可以事先将处理好的图像存于计算机硬盘里,再利用查表的方式进行实时调用传输即可。

(4) 光场三维显示技术的应用前景。基于光场重建的 360° 可探入悬浮三维显示有着广阔的应用前景。光场三维显示的悬浮性、可探入性加上丰富的人机交互手势,将使得光场三维显示拥有更广阔的发展前景。这种三维显示技术会与个人电脑、智能手机一样,不仅仅是一种新技术,还会带来一场改变我们现有的生活模式的革命。

例如,可建造电子军事沙盘。它利用可探入式的光场三维显示系统,通过计算机迅速地构造模型,然后由输出设备进行投影,实现 360° 的悬浮三维显示。这种沙盘制作快捷而且便于运输,甚至可以依靠计算机运算分析能力,进行敌我态势预估和虚拟对抗。

又如,可将其应用于博物馆内文物或其他艺术品的虚拟展示,这种展示不受时间、地点和空间的限制,若在此基础上进一步应用人机交互技术,则参观会变得更加直观。如人们可以翻转瓷器来观看它的底部特征,对某些质量巨大的艺术品,也可以随人的手势任意翻转。

再如,还可将其应用于一些机械结构的加工。在可探入式的三维显示系统中,无须在计算机上频繁地输入坐标,以及各种零部件的命令,只需利用人机交互直接进行操作,设计过程就像组装虚拟的积木一样,更加直观和快捷。

3. 全息三维显示技术

(1) 全息三维显示技术的基本原理。人是通过接收自然界反射/辐射的光波来对物体进行观察的,这些光波携带的信息包括振幅相位。其中,振幅信息反映了物体的表面特性(比如颜色、材质和光照效果等),而相位信息则反映物体的空间位置特性。目前,市场上的图像记录和显示设备只能记录和显示物体的振幅信息,没有保存表示物体立体结构特征的相位信息。

而全息技术利用干涉原理,能将光波的振幅和相位信息记录下来,使物光波的全部信息都存储在记录介质中。当用光波照射记录介质时,根据衍射原理,就能重现出原始物光波,从而实现十分逼真的三维图像。因此,基于全息技术的三维显示技术,被认为是目前最理想的三维显示方式。

(2) 全息三维显示技术的发展现状。20 世纪发明的全息术是一种基于物理光学原理,以完整记录和重建三维物体光波为基础的三维显示技术。由于全息的再现光波保留了原有物体光波的全部信息(振幅信息和相位信息),故全息再现影像与原始物体有着完全相同的三维特性,能够提供人眼视觉系统所需的全部深度感知信息。人们在观看全息再现影像时,会得到与观看原物时完全相同的视觉效果。全息术被国际上广泛认为是最有发展前景的真三维显示技术。

传统的全息术基于光学记录材料,主要用来显示静态图像和具有简单动作的动态图像。但由于三维显示的媒介是一张张的全息图,且其制作受到光学记录材料、制造工艺、成本、实验环境要求等方面的限制,因此这种技术并不适于视觉信息的传输和共享。目前,传统的全息图主要用于艺术创作、室内装饰、博物馆展示、信用卡、票据和商品防伪等。

计算全息三维显示技术,是近年来全息术与光电信息技术及计算机高速计算技术相结合发



展起来的一种最具潜力的真三维显示技术。最早成功实现计算全息三维图像视频显示的是美国麻省理工学院媒体实验室 Benton 领导的空间光学成像试验小组,他们自 1989 年以来先后开发了以扫描声光调制器为核心的三代全息投影显示系统。其中第二代系统可以显示成像空间为 $150\text{ mm}\times 75\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 和视场角为 30° 的三维图像。但是由于声光调制器是一个一维装置,必须通过扫描镜来获取水平和垂直的图像,因此该系统在使用时受到了限制。

英国 QinetiQ 公司和剑桥大学高级光子和电子技术中心,于 2004 年利用电寻址的液晶空间光调制器和光寻址的双稳态液晶空间光调制器,研制了一套视频显示的计算全息三维投影显示系统,其像素数超过 100 M,且帧速刷新频率为 30 Hz,通过视频方式可显示宽度大于 300 mm 的全视差三维彩色图像。该系统采用了 4×4 的光寻址液晶空间光调制器拼接和 400 个 CPU 并行运算,系统复杂且造价昂贵。

2010 年,美国亚利桑那大学光学科学学院的 Nasser Peyghambarian 博士领导的小组研制了一种基于新型全息记录材料的全息显示技术,可以以 2 秒/帧的刷新率显示窗口大小为 $250\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ 的三维图像。该技术一经发表,就引起了轰动。媒体认为其有望让电影“星球大战”中的场景出现在真实现实生活中。这项技术的进展,使得我们离制造出远程、具有临场感的全息三维显示装置这一终极目标又近了一步。该装置最终能够将高分辨率、全彩色、图像尺寸与人类大小相仿的三维影像,以视频形式从世界的某个地方传送到另一个地方。

综上所述,传统全息技术是利用空间物理光学进行再现图像的,它使用银盐、明胶等化学介质和感光材料来记录全息图。随着计算机技术和数字传感技术的发展,图像分辨率逐步提高,特别是 CCD 与 CMOS 等数字成像元件的出现,全息技术从需要化学介质感光材料记录及化学处理发展到数字记录及数字再现,从而形成了一门全新的数字全息技术。

采用数字全息可实现动态三维显示,但目前尚不能得到高分辨率的空间光调制器。为此,一种基于可擦写材料的全息三维显示技术应运而生。该技术的关键是采用了基于光生电荷运动和诱捕的光致折变聚合物材料,这种材料具有可逆特性。利用两束相干激光和外部施加电场在聚合物中形成复制干涉图案的空间电荷场,空间电荷效应对局部折射率进行改变,使得全息图以折射率图案的形式编码。研究人员已研究出基于可擦写材料的全息三维显示系统,但存在全息图对震动敏感以及还没有完全达到实时更新等问题。研究人员力求研制出更快速记录和低延迟时间的光折变聚合物,从而实现真正的动态全息三维显示。

此外,国内的清华大学、北京理工大学等高校也对计算全息三维显示进行了研究,并在全息图计算算法、三维显示系统等方面取得了卓有成效的进展。

(3) 计算全息三维显示技术的优势。计算全息技术的出现、空间光调制器等光电子器件的发展以及计算机计算能力的迅速提高,使动态全息三维显示逐渐成为可能。与传统的光全息术相比,计算全息术避开了传统全息术记录光路的限制,可对其他手段获得的三维数据或人工制作的三维模型通过计算机设备进行全息图计算。

计算全息三维显示技术的优势包括:灵活,可重复性好,可充分利用光能,可显示虚拟和真实物体,可显示三维物体外观或者透视其内部,可让观察者从任意角度观看影像,可实现虚拟现实和增强现实,令观察者与真实场景和虚拟场景产生互动等。

基于此,计算全息术在军事、医疗、工业、商业、教学、科研、影视、娱乐等众多领域具有十分广阔的应用前景。

(4) 图形处理器在全息三维显示技术中的应用。为了提高全息图的计算速度,日本千叶大学的 Tomoyoshi Ito 小组,开发出专门用来对全息图计算进行加速的硬件设备 HORN 系列,其

计算速度比当时普通计算机的速度大约提高了 4 000 倍。

在过去的十几年间,图形处理器 CPU 的计算能力有了飞速的发展,其每秒万亿次的计算性能吸引了很多人的关注。一般来说,CPU 擅长处理的是循环、分支、逻辑判断,以及执行等逻辑程序,而对于具有上百个线程的并行执行则无能为力。图形处理器擅长处理的是没有逻辑关系的高度并行数值计算,其优势是可以执行上千个无逻辑关系数值的并行计算,即在同一个程序操作中运行多个并行数据。在处理从一般信号处理、物理模拟、金融计算或者生物计算所获得的大量数据集时,许多算法都可以通过并行数据处理得到加速。

全息图的计算机生成过程是,对三维物体所有离散点发出的光波在全息平面上所有抽样像素点的复数振幅分布,进行计算的过程。每个离散点在全息平面不同抽样点执行的计算过程完全相同,且每个过程相对独立。因此,全息图的计算具有很高的并行性。正因为图形处理器的这种处理大数据量的能力和全息图的计算过程的高度并行性,科学家们纷纷开始利用图形处理器加速全息图的计算。如德国学者 Lukas Ahrenberg 利用图形处理器硬件对具有 1 万个物点、像素数为 960×600 的全息图进行计算,共耗时 1 秒。2010 年,日本千叶大学的 Tomoyoshi Shimobaba 比较了市场上图形处理器主要生产厂商 ATI 和英伟达 NVIDIA 生产的图形处理器的计算性能,实验表明,在 OpenCL 架构下,ATI 生产的图形处理器计算速度是 NVIDIA 的 2 倍。图形处理器在计算全息术中的应用,大大提高了全息图的计算速度,为三维图像的实时动态显示带来了曙光。

(5) 计算全息三维显示技术所面临的挑战及解决方法。计算全息三维显示技术是一种理想的真三维显示技术,但该技术仍然面临诸多技术难题,诸如再现影像尺寸和视场角较小,相干光源、光电显示器件引起的噪声和真彩色显示等技术难题还有待解决。如果这些问题得不到解决,该技术仍然无法进入实际的应用阶段。计算全息三维显示发展至今,尽管在各方面取得了进展,但始终受到两个问题的制约。

① 全息再现影像的质量受限。由于计算全息三维显示通常需要借助空间光调制器来显示三维图像,因此全息再现影像的质量受目前空间光调制器的阵列大小、像素尺寸、空间带宽积(可以简单认为是像素数)、填充率、刷新频率、衍射效率等性能参数的限制。其中,空间光调制器的像素数直接决定了再现三维图像的尺寸和视场角。目前的尺寸仍然较小,降低了三维显示效果,且仅能供一人观看。假设再现光的波长为 632.8 nm 的红光,要想获得再现影像尺寸大小为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,水平与垂直视场角均为 30° 的三维图像,至少需要空间光调制器的像素数达到 10^{12} 量级,因而要想获得大尺寸和大视场角的三维图像就需要大阵列的显示设备。但是,目前市场上可以买到的纯相位型空间光调制器像素数,仅为 1920×1080 ,显然无法满足要求。

一个解决办法是,使用多空间光调制器无缝拼接,通过增大系统总像素数获得大尺寸和大视角的三维图像,但是这种方法增加了系统的复杂度且成本较高。另一方面,若利用时分复用的方法,则需要高帧频的空间光调制器。由此可见,目前还没有一种方法能摆脱显示器件的限制,有效提高再现三维图像的尺寸与视场角。因此,发展高分辨率的空间光调制器,是提高计算全息三维显示图像质量最直接有效的方法。

2013 年,美国麻省理工学院在 Nature 上报道了他们最新研制的基于波导和声光效应的新型空间光调制器。与传统基于液晶的空间光调制器相比,该新型空间光调制器有效增大了空间带宽积,能够获得较大的衍射角,同时消除了空间光调制器引入的零级光和多级衍射光等噪声的干扰,而且其制造成本大幅降低。该技术为突破目前器件的瓶颈问题提供了一个新的方向。



② 全息图的计算速度达不到实时显示的要求。全息图的计算机生成,主要包括三维物体模型的建立与全息图的计算。在计算机图形学中,为了更精确地描述三维物体模型,通常需要使用海量的点基元或面基元,以及一些光照阴影、渲染材质、遮挡效果等信息,因而所需的数据量非常庞大。在全息图的计算过程中,通常将组成三维物体模型的点基元或面基元看作是一个个发光源。

全息图计算的核心,就是计算所有离散点基元或面基元发出的光波在全息图平面上的复数振幅分布,并对全息图上所有抽样点像素进行计算,因此,全息图的计算量也十分巨大。为了能够实时动态地显示三维图像,全息图的计算速度至少要达到 25 帧/秒,但对于计算三维物体上一个点基元的全息图,传统的方法所需的时间为几十毫秒,远远无法满足实时动态显示要求。

为了提高全息图的计算速度,根据目前的报道,科学家们主要采用改进全息图计算算法的方法。由于全息图的计算速度依赖于计算机设备的计算能力,因此发展高性能的计算设备也是一条有效途径。其中一个目前公认为较好的解决方法,就是前述的图形处理器在全息三维显示技术中的应用,它让人们见到了曙光。

4. 光栅三维显示技术

光栅三维显示是基于双目视差深度暗示的三维显示技术,分为狭缝光栅三维显示和柱透镜光栅三维显示两种。

(1) 狭缝光栅三维显示技术。狭缝光栅三维显示的结构和原理如图 9-34 所示。狭缝光栅三维显示由二维显示屏和狭缝光栅精密耦合组成,其中,狭缝光栅由相间排列的透光条和挡光条组成。通过透光条和挡光条,左眼和右眼可以分别观看到二维显示屏上与狭缝光栅对应排列的左视差图像和右视差图像,从而实现左右视差图像的光线在空间上的分离。

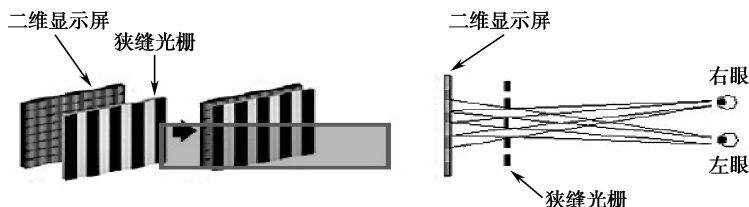


图 9-34 狭缝光栅三维显示的结构和原理

(2) 柱透镜光栅三维显示技术。柱透镜光栅三维显示的结构和原理,如图 9-35 所示。柱透镜光栅三维显示由二维显示屏和柱透镜光栅精密耦合组成,其中柱透镜光栅由众多完全相同的柱透镜单元平行排列而成。在柱透镜单元的排列方向上,每个柱透镜单元将置于其焦平面上不同位置的左右视差图像光折射到不同方向,从而实现左右视差图像的光线在空间上的分离。

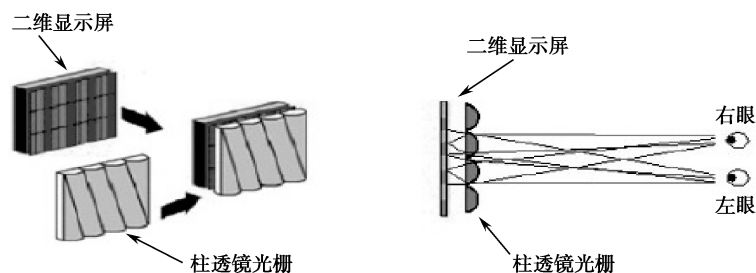


图 9-35 柱透镜光栅三维显示的结构和原理

综上所述,光栅三维显示就是将左右视差图像交错排列在二维显示屏上,利用光栅的分光作用将左眼视差图像和右眼视差图像的光线向不同方向传播。根据双目视差深度暗示原理,当观看者位于合适的观看区域时,其左眼和右眼分别观看到左视差图像和右视差图像,经大脑融合便可感知到具有三维感的图像。

在制作方面,狭缝光栅比柱透镜光栅要简单,成本也比柱透镜光栅低,然而由于在狭缝光栅三维显示中,狭缝光栅挡光条部分对光线的遮挡导致三维图像亮度降低,大大影响了其应用;而在柱透镜光栅三维显示中,柱透镜光栅为透明介质,只吸收小部分光,因此对三维图像亮度影响较小。随着工艺的不断成熟,柱透镜光栅三维显示得到了广泛应用,成为目前裸视光栅三维显示的主流。

5. 集成成像三维显示技术

(1) 集成成像三维显示原理。集成成像三维显示技术是利用微透镜阵列对物空间的场景进行记录,并再现空间场景的基于多种深度暗示的真三维显示技术,其起源于1908年诺贝尔奖获得者 Gabriel Lippmann 提出的集成摄影术。集成成像三维显示包括记录和再现两个过程,其原理如图9-36所示。

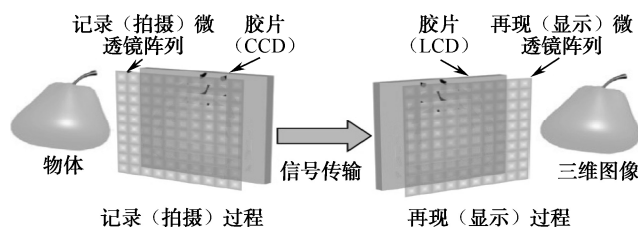


图 9-36 集成成像三维显示的原理

其中的记录过程,是利用一个记录微透镜阵列对物空间场景成像,并把图像记录到位于微透镜阵列焦平面处的胶片上。每个透镜元对应生成一幅不同方位视角的微小图片,即图像元。通过这一过程,物空间任意一点的立体信息,被与透镜元个数相同的图像元扩散记录到整个胶片上,胶片上所记录到的像称为图像阵列。

其中的再现过程,是利用与记录微透镜阵列具有同样参数的再现微透镜阵列,把记录有图像阵列的胶片,放在再现微透镜阵列后方的焦平面处,根据光路可逆原理,再现微透镜阵列把许许多多图像元透射出来的光线聚集还原,从而在再现微透镜阵列的前方,重建出物空间场景的三维图像。

随着电荷耦合器件 CCD 和液晶显示器 LCD 的发展,记录端的胶片可由电荷耦合器件代替,再现端的胶片可由液晶显示器代替,其对应的两个过程分别称为拍摄和显示。

(2) 集成成像三维显示模式。根据微透镜阵列与显示屏间的距离 g 与透镜焦距 f 之间的关系,集成成像三维显示模式可分为实模式、虚模式和聚焦模式三类。

- 当 $g > f$ 时为实模式,三维图像位于显示微透镜阵列前方。
- 当 $g < f$ 时为虚模式,三维图像位于显示微透镜阵列后方。
- 当 $g = f$ 时为聚焦模式,可在微透镜阵列的前后同时显示出三维图像。

集成成像三维显示可供多人同时观看到具有全视差、全真色彩的三维图像。但由于成像使用的是微透镜阵列或针孔阵列,以及受到拍摄器件和显示器件的分辨率有限等因素的制约,目



前集成成像三维显示存在三维图像深度反转、深度范围小、分辨率低和观看视角窄等不足。随着技术的发展,这些问题正在逐步解决。

真三维立体显示技术是一种全新的三维图像显示技术,基于这种显示技术可以直接观察到具有物理景深的三维图像,该技术具有全视景、多角度、多人同时观察,即时交互等众多优点。它将引领科学可视化进入崭新的发展方向,具有广阔的应用前景。因此,能够真实反映真实世界的三维显示技术,被誉为 21 世纪最伟大的革命之一。

9.4 光电信息显示技术的发展趋势及其在安防中的应用

上面已介绍了三大类图像显示技术,从介绍中也可看出它们的发展趋势。

9.4.1 平板显示技术的发展趋势

众所周知,平板 LCD 显示技术目前已基本取代了 CRT 显示技术,但由于 LCD 是被动显示技术,而主动显示技术中,PDP 与 LED 显示技术虽有各自的特点,但有的还未超过 LCD,因而不能取代 LCD。

自 OLED 技术发展之后,其进展相当迅速。主要原因是它不需要长晶格的制作过程,也没有涉及晶粒制作程序,制造过程更较发光二极管简单。制作 OLED 的材料一般都是有机化合物,开始使用纯有机化合物,五、六年前发现将有机化合物混入金属,有助提高 OLED 的亮度及效果。因此,现多用有机金属混合物来制作。目前,OLED 红、绿、蓝三色材料的发光效率和发光寿命均基本满足实用化需求,现在的 OLED 在亮度 500 cd/m^2 下,至少有 20 000 h 的工作时间。

1. TFT-LCD 与 OLED 显示技术的比较

TFT-LCD 与 OLED 显示技术的比较如表 9-6 所示。

表 9-6 OLED 和 TFT-LCD 显示器的比较

参 数	OLED	TFT-LCD
发光方式	自发光	需要背光源
响应时间	几个微秒	40 ms
发光效率	15 lm/W	4~8 lm/W
视角	170°	120°
能耗	可低至 1 mW	使用背光源,能耗大
厚度	1~1.5 mm	5 mm
工作温度	-40℃~85℃	0℃~50℃
环保性能	材料满足绿色环保要求	使用含有水银等有害物质的背光源
抗震性能	全固态,无真空、液态物质,适于震动环境	液晶材料抗震性能差
柔性设计	可采用能弯曲的塑料基板实现柔性显示	不能实现柔性显示
彩色方式	RGB 像素独立发光或彩色滤光片或光色转换	彩色滤光片



续表

参 数	OLED	TFT-LCD
制造工艺	简单，因结构优异简化	复杂，因要背光源等更多材料与组件
制造成本	大规模量产产比 LCD 低 40%左右	复杂工艺与更多材料使成本偏高
显示尺寸	具有达到 500 英寸的潜能	最大几十英寸
质量	手机应用中小于 1 g	手机应用大约 9 g

由表可见，表中所列的 15 种参数均优于 LCD，因而 OLED 将在不久取代 LCD，而成为显示器市场的主流。但值得指出的是，表中未列入寿命这一参数，实际上目前 OLED 显示器的寿命（尤其在大尺寸显示上的寿命）还不及 LCD，这是今后必须克服的。

2. OLED 与 QLED 显示技术的比较

由 9.1.4 节可知，OLED 显示面板的原理是：在 TFT 驱动结构上，涂覆细小的三原色或者白色 OLED 材料（利用白色 OLED 材料需要在 TFT 表面层增加三原色彩色滤光膜），形成密集的独立发光的 OLED 灯珠阵列。对这个阵列的有效控制，形成可观看的画面。

OLED 的这种显示结构原理，也适用于 QLED。其主要变化就是将 TFT 结构上的 OLED 材料，换成电致发光 QLED 材料，而其他工艺和技术几乎不用改变。这样制造出来的显示面板就是 QLED 显示产品，其具有媲美 OLED 面板的色彩、对比度、亮度、分辨率等特点。

下一代显示面板的主要材料是采用 OLED 或者 QLED，包括成本、稳定性、寿命、色彩效果、反应时间等关键显示技术指标中，二者具有很高的相似性。例如，二者色彩表现和原色纯度都远高于液晶产品，在 TFT 工艺上都对大电流驱动要求较高，宜采用金属氧化物或者低温多晶硅，而不是非晶硅 TFT 工艺。同时，目前二者也都具有寿命不及液晶面板的缺陷。

但是，QLED 和 OLED 毕竟是两种不同的材料产品，在最终的材料涂覆工艺中，必然表现出差异性。相比 OLED 材料，QLED 材料对于印刷工艺的支持更好，成熟也更快。这就使得 QLED 材料用于显示面板，可以避开真空蒸镀这类在大尺寸产品上成本高、成品率和稳定性、均匀性控制困难的工艺。

与现在 LG 量产的白光 OLED 配合三原色滤光膜的显示技术体系比较，直接印刷工艺涂覆的 QLED 显示面板，成品率更易于控制、工艺更简单、整体面板的色彩性能和能效指标也会更高。

但是，与 OLED 产品研究较早、市场已经出现大规模的量产支持者比较，QLED 的时间劣势明显。如果 OLED 也解决了印刷制作工艺的难题，并提升了材料寿命，量子点 QLED 技术的市场前景就会变得暗淡。但是，2014 年由于三原色涂覆工艺的成品率难题，三星已经暂缓了 OLED8.5 代线的建设，这就为 QLED 成为下一代显示技术的一种选择留下了空间。

从产业进程看，如果 QLED 和 OLED 都成熟了，液晶面板生产线改造，对于二者的成本差异不会异常巨大。液晶面板线在 TFT 工艺阶段的所有技术积累和设备都会被保留，变化的部分仅仅限于液晶涂覆工艺与 QLED 和 OLED 涂覆工艺的不同。

因此，不仅是从 OLED 和 QLED 自身的比较看，还是从产业进程演进看，OLED 和 QLED 谁能成功的关键就集中在涂覆工艺，尤其是印刷（喷墨印刷、激光热转印）等技术谁先成熟上。当然，市场较量的结果也未必是生死之战，未来市场也可能存在 QLED 技术改进的液晶显示、OLED 显示和 QLED 显示技术三国争霸的局面。



用 QLED 改进的液晶显示技术，会随着苹果手机巨大的号召力，成为 2014 年下半年显示技术行业的热点。在更长的时间尺度上，OLED、QLED 技术改进的液晶、QLED 显示面板，三个技术种类之间的竞争将不会停止。

上面已经介绍了 OLED 和 QLED 比较的差异，以及涂覆工艺对于二者成败的根本性的决定价值。下面重点说一下二者与 QLED 改进后的液晶产品的市场比较。

3. OLED 和 QLED 与 QLED 改进后的液晶产品的市场比较

应用 QLED 技术改进液晶显示，最大的优势在于继承了液晶技术成熟的产业体系，现有技术足以支撑 QLED 对液晶背光系统进行改建的工艺要求：这种改进后的液晶显示产品品质会显著提升、成本不会剧烈变化——简单讲，这种产品的优势就是成熟。

利用这个成熟的优势，QLED 改进的液晶技术，可以在 OLED 成本没有大量下降，或者 QLED 面板没有成熟前，依靠价格和产能优势，占领大量市场份额。但是，产业成熟这种优势，必须建立在竞争者不成熟的基础上。

一旦 OLED 和 QLED 显示面板技术成熟，哪怕只有一个成熟，都意味着液晶传统价格优势难以保持。因为这两个显示技术都是自发光显示，不仅显示效果要优于任何改进技术下的液晶显示产品，更会因为不需要背光源而具有制造成本优势。

而且，液晶和 OLED、QLED 的竞争，与液晶和等离子的竞争是完全不同的。后者是两个技术体系、产业体系的较量；前者则都是半导体显示范畴内的竞争。液晶显示面板与 OLED 和 QLED 显示面板在产业链和工艺设备上具有 7 成以上的相通性。产业界更是把 OLED 或者 QLED 看成是液晶面板技术自然演化升级的方向和结果，而非看作你死我活的竞争对手。

以上这些产业特点，决定了未来数年，显示业界会迎来一个传统液晶、QLED 改进液晶、OLED 和 QLED 等多种半导体平板显示技术混乱竞争的时代。苹果的新手机、TCL 的新彩电，只不过是这场新混乱的开始而已。

由上可知，平板显示技术的发展趋势还应是 OLED 与 QLED 显示技术。

9.4.2 投影显示与大屏显示技术的发展趋势

1. 投影显示技术的发展趋势

由前面介绍的投影显示技术的 4 种显示技术中，显然以用 DMD 芯片的 DLP 投影显示与激光投影显示技术为最好，因为 DLP 有数字光学处理，而激光投影显示技术则融合了光阀与 DLP 而具有独特的 6 大特点，可最大限度地展现人眼可以识别的色彩，真实地再现客观世界丰富、艳丽的色彩，可多用户同时与机器交互，能实现不用眼镜的真三维显示。显然，投影显示技术的发展趋势是向激光投影显示技术的方向发展。

2. 大屏幕拼接系统的发展趋势

随着信息化技术的提高，人们对于视觉欣赏的要求越来越高。视觉冲击力成为人们评判显示性能的一个标准。视觉冲击力不仅来自于清晰的画面，还来自于超大尺寸的画面。为了满足这种诉求，大屏拼接应运而生。此外，能实现超大画面的还有基于投影技术的边缘融合技术。

目前，比较常见的大屏幕拼接系统，通常根据显示单元的工作方式分为二个主要类型：一是

PDP、LED、LCD 平板显示单元拼接系统,其缺点是有拼接缝隙;二是 DLP 投影单元拼接系统,其优点是无拼接缝隙。而边缘融合拼接系统也是无缝拼接。显然,大屏幕拼接系统,必须向无拼接缝隙的系统,如 DLP 与边缘融合技术的方向发展。

3. 边缘融合技术及其优势

所谓的边缘融合技术就是将一组投影机投射出的画面进行边缘重叠,并通过融合技术显示出一个没有缝隙、更加明亮、超大、高分辨率的整幅画面,画面的效果就好像是一台投影机投射的画质。当两台或多台投影机组合投射一幅两面时,会有一部分影像灯光重叠,边缘融合的最主要功能就是把两台投影机重叠部分的灯光亮度逐渐调低,使整幅画面的亮度一致。这种边缘融合的技术优势如下。

(1) 增加了图像尺寸与画面的完整性。多台投影机拼接投射出来的画面一定比单台投影机投射出来的画面尺寸更大;鲜艳靓丽的画面,能带给人们不同凡响的视觉冲击。另外,采用无缝边缘融合技术拼接而成的画面,要很大程度上保证了画面的完美性和色彩的一致性。

(2) 增加了分辨率与可达超高分辨率。每台投影机投射整幅图像的一部分,这样展现出的图像分辨率被提高了。比如,一台投影机的物理分辨率是 800×600 ,三台投影机融合 25% 后,图像的分辨率就变成了 $2\,000 \times 600$ 。

同利用带有多通道高分辨率输出的图像处理器和计算机,可以产生每通道为 $1\,600 \times 1\,200$ 像素的三个或更多通道的合成图像。如果融合 25% 的像素,可以通过减去多余的交叠像素产生的 $4\,000 \times 1\,200$ 分辨率图像。目前市场上还没有可在如此高的分辨率下操作的独立显示器。其解决办法为使用投影机矩阵,每个投影机都以其最大分辨率运行,合成后的分辨率是减去交叠区域像素后的总和。

(3) 缩短了投影距离,提高了空间利用率。随着无缝拼接的出现,投影距离的缩短变成必然。比如,原来 200 英寸 ($4\,000 \times 3\,000$ mm) 的屏幕,如果要求没有物理和光学拼接,我们将只能采用一台投影机,投影距离=镜头焦距 \times 屏幕宽度,采用光角镜头 1.2:1,投影距离也要 4.8 m,现在采用融边技术,同样画面没有各种缝痕,距离就只需要 2.4 m,从而提高空间利用率。

(4) 能在特殊形状的屏幕上投射成像。比如,在圆柱或球形的屏幕上投射画面,单台投影机就需要较远投影距离才可以覆盖整个屏幕,而多台投影机的组合不仅可以使投射画面变大投影距离缩短,而且可使弧弦距缩短到尽量小,对图像分辨率、明亮度和聚集效果来说是一个更好的选择。

(5) 增加了画面层次感与亮度。由于采用了边缘融合技术,画面的分辨率、亮度得到增强,同时配合高质量的投影屏幕,就可使得整个显示系统的画面层次感和表现力明显增强。

总之,边缘融合是一组投影机投射出的画面进行边缘重叠,因此从理论上讲,利用边缘融合技术显示的画面可以是无限大的而且是清晰的。而大屏拼接则会随着显示画面的扩大,无论是从技术上还是空间布局上都会更加困难。因此,具体来讲,边缘融合技术更加适用于空间较大的场所,即所谓超大的空间清晰应用。

显然,在投影显示与大屏显示技术中,其发展趋势是向激光投影显示与边缘融合技术的方向发展。



9.4.3 3D 立体显示技术的发展趋势

1. 三维显示技术所应该解决的核心问题

三维立体显示作为当今世界各国大力发展的下一代新型显示技术,正逐渐成为一个引人注目的前沿科技领域。近年来,立体显示技术在电视广播、视频游戏、医疗、教育等领域的应用越来越多,三维显示已从电影银幕向电视终端、计算机终端、智能手机终端、平板电脑终端等发展。

我们生活在三维的立体世界中,然而呈现在人眼(单个的左眼或右眼)视网膜上的图像却是二维图像,这些二维图像在经过人脑复杂的融合反应后,最终呈现出三维图像。现代心理学认为这个复杂的融合反应分为生理学和心理学两个层面,具体又分为 10 种深度暗示,人们就是通过这些深度暗示来感知三维物体。其中,在心理学层面对人们感知三维物体起主要作用的有 6 种暗示,在生理学层面对人们感知三维物体起主要作用的有 4 种暗示。三维显示技术所要解决的核心问题是如何为人眼感知三维物体提供所需的上述 10 种深度暗示信息。

(1) 基于心理深度暗示形成 3D 效果图像。人们在观看一幅二维图像时,往往会根据长期积累的生活经验,通过心理深度暗示(借助经验和假想从出现在视网膜上的平面图像得到一定程度的深度感)就可以判断出图像中物体的远近深浅关系。基于心理深度暗示在人们心中形成的 3D 效果图像如图 9-37 所示,由图可见,人们是通过圆球的亮暗差异、阴影效果,以及木板的远近宽窄变化等心理深度暗示,就可以感觉到这张二维图像所带来的三维效果。



图 9-37 基于心理深度暗示形成的 3D 效果图像

三维图像的 6 种心理深度感知主要有 6 种,具体包括:

- ① 线性透视。可根据人们的观察习惯,景物向远处延伸时,所观察到的尺寸逐渐缩小。
- ② 像的大小。是指很多物体的实际尺寸在人脑中都有一个固有的先验知识,因此可以通过图像的大小感知物体的远近,从而提供一种心理暗示。
- ③ 重叠。两个物体轮廓的重叠关系会产生暗示,通常认为被遮挡的部分处在下方或者远处等。
- ④ 光照及阴影。二者会产生一种极强的深度暗示。
- ⑤ 结构梯度。与线性透视类似,当我们注视诸如地板砖或大理石路面的均匀梯度时,其表面粗糙度方面的梯度会产生一种深度暗示。
- ⑥ 面积透视。在观看一幅二维图像时,人们总认为看起来比较模糊的景物处在远方,这是因为在人们的实际生活中,远处景物发出的光线在传播中被空气中的微粒散射而显得模糊。三维图像的 6 种心理深度感知如图 9-38 所示。

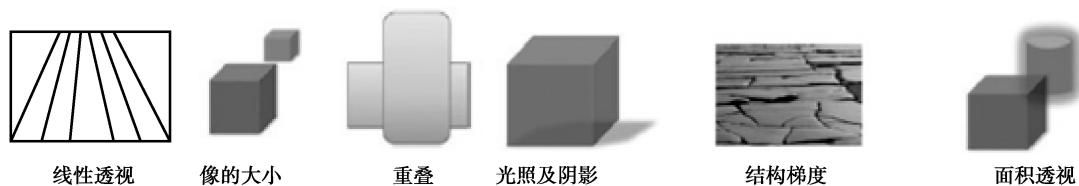


图 9-38 三维图像的 6 种心理深度感知

(2) 基于生理深度暗示形成 3D 效果图像。人们通过心理暗示在二维图像上感觉到的三维场景也只局限于二维层面。而在现实世界里,人们更多的是根据单眼立体视觉暗示和双眼立体视觉暗示等生理暗示来获得真实世界的三维感知。

这种生理深度暗示主要有 4 种,是视觉感知三维信息的直接要求,具体包括:

① 调节。一种三维图像的生理深度感知——调节,如图 9-39 所示。通过拉伸纤毛体的肌肉,调节眼睛晶状体的焦距,使观察者可以看清楚远近不同的景物或者同一景物的不同部位。

② 汇聚。一种三维图像的生理深度感知——汇聚,如图 9-40 所示,当观察者的眼部肌肉被拉伸使眼球略微转向内侧以便对着三维物体上某一点观看时,两只眼睛的视轴所组成的角度称为会聚角。左右眼在观看远近不同的两点时,产生出的会聚角不一样,眼部肌肉受到的拉伸强度和眼球转动的程度也不一样,而人的感觉器官可以比较出这种强度和程度,这样便会有不同深度的感觉,即产生立体感。通常来说,物体离观察者越近,则会聚角越大,物体远则会聚角小。



图 9-39 调节

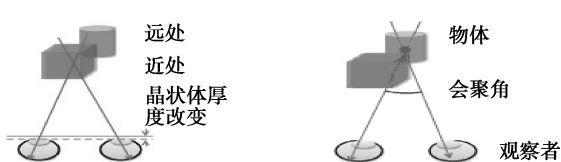


图 9-40 汇聚

③ 双目视差。一种三维图像的生理深度感知——双目视差,如图 9-41 所示,双目视差是由人眼的瞳孔间距所引起的。观察者在观看空间三维物体时,三维物体发出的光线聚焦于双眼的视网膜中心,由于人的两只眼睛之间有一定的距离(被称为瞳孔间距,其平均值为 6.5 cm),因此对于同一景物,左右眼的相对位置是不同的,这就产生了双目视差,即左右眼看到的是有差异的图像。

④ 移动视差。一种三维图像的生理深度感知——移动视差,如图 9-42 所示,如果观察者的观察位置发生变化,观察到的三维物体也会相应地发生变化,这个效应称为移动视差。

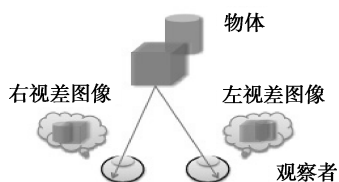


图 9-41 双目视差

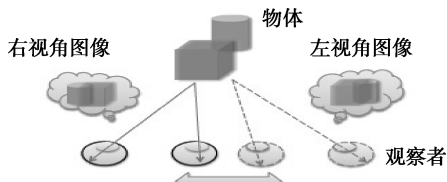


图 9-42 移动视差



2. 基于双目视差的三维显示

目前,主流的三维显示技术主要基于双目视差这种生理深度暗示(图 9-41 相关部分),通过模拟人眼视觉,用摄影机/摄像机在位于同一水平线上的两个拍摄点拍摄同一物体,得到两幅视差图像,然后通过光学等技术手段,使观看者的左眼和右眼只能分别看到对应的视差图像,当前的 3D 电视广播就是采用这一原理。

凭着基于双目视差原理的三维显示,目前,人们已经可以在电影院或者在家里享受到三维显示技术带来的乐趣。这种已经面向市场成为当下主流的三维显示技术,通常需要观看者佩戴特殊的眼镜(如红蓝眼镜、偏振眼镜或电子式快门眼镜等)。

这种技术通过模拟人眼生理学深度暗示中的双目视差,将含有不同视差信息的二维图像传输到观察者的左右眼中,通过在人脑中的融合,给予深度信息感知,从而使观看者获得三维深度感。

但是人们在使用基于二维视差图像的三维显示设备观察三维图像时,每次只有一组二维视差图像进入眼中,其携带的信息不能提供人眼所需的全部三维深度感知。此外,由于人眼通常聚焦在二维显示屏幕上,而三维画面是在屏幕的前面或后面,这种辐辏和调焦的矛盾不仅加重人眼与大脑的负担,而且长时间观看会导致眼睛疲劳和不适,甚至可能引起精神上的障碍。视疲劳也许是一种对长期观看立体显示造成的身体损害的警告,视觉敏感性较低的人可能会突发严重的损害。

3. “真”三维显示技术成为研究热点

由前述可知,开发符合人眼观看习惯的“真”三维显示技术,显得尤为重要。于是,真三维显示技术成为当下三维显示领域的研究热点。而发展符合人眼生理认知习惯的新型高分辨率动态三维显示技术,已经成为信息领域的一个重大研究课题。

基于多种心理深度暗示与生理深度暗示原理,真三维显示通过各种手段直接在空间显示,或使物体在一定空间范围内再现,使之和观看自然界的物体类似。

其实,真三维显示技术所要解决的核心问题,是如何为人眼感知三维物体提供前述的 10 种深度暗示信息:如果某一种(意思是可以有多种)三维显示技术能同时提供人眼在生理学上的 4 种深度暗示,那么该技术可以称为“真”三维显示技术。当然,进一步地说,如果某一种三维显示技术同时还能提供心理学上的 6 种深度暗示,那它将更符合人眼的观察习惯,从而使观察者在观察三维影像时,犹如在观察一个真实存在的物体。这样,就能完全满足人类对真实场景的三维视觉体验,显然这将是人类发展显示技术追求的终极目标。

因此,相对于当下主流的基于双目视差深度暗示的三维显示技术,真三维显示技术不会造成观看者的视觉疲劳,其显示的图像更加真实,更符合人们的视觉习惯,所以能够真实反映真实世界的三维显示技术,被誉为 21 世纪最伟大的革命之一。

4. 三维显示技术的发展趋势

显示技术经历了由黑白显示到彩色显示,由普通彩显到高清晰度彩显的过程,目前,平面显示技术已经取得了很大的成就。但因为客观世界是一个三维世界,任何实物都具有 x 、 y 和 z 三维性,为了追求最大限度的真实重现,其中主要的一种方式就是实现立体感。目前已商业化

的显示技术,只能在平面显示器(x, y)上实现对三维世界的表达,在真实感上,离用眼睛直接去观看客观事物仍有很大差异。诚然,平面显示在某种程度上给人三维的立体感觉,但只是在二维显示技术基础上基于心理的认知。从本质上讲,不能算是真正物理意义上的三维立体显示。现有的大部分立体显示技术,在显示的视角上大多达不到广角要求,因为它们脱胎于二维显示,始终没有摆脱传统的二维显示屏幕 180° 显示空间的限制。此外,还要借助立体视镜,或者要借助平面显示屏上的视差效果。

目前,主流的三维显示已经占据了大半壁江山,已知的三维显示设备包括立体视觉、头盔式显示器、CAVE、裸眼立体显示器和真三维显示等。

显然,在3D立体显示技术中,将逐渐从主动式眼镜、偏光式眼镜,朝向裸眼3D、真3D立体显示技术的方向发展。

9.4.4 光电信息显示技术在安防中的应用

众所周知,光电信息显示技术在安全防范技术领域应用非常广泛,因为任何一个安全防范系统的前端设备所采集的信息,都要通过传输系统传到远端监控指挥中心去显示出来。因此,显示器是安防监控系统必不可少的重要终端设备。

由于市场对安防监控系统的需求有大有小,因而其所需求的终端显示设备也有大有小,所以本章所述的各种大小显示设备都可供选用。详情可参阅本书参考文献[5],以及后续专业课终端设备中。

最后,在选用显示设备时,还需提出注意如下几点。

(1) 安防监控场景图像显示画面与电视电影图像显示画面的要求有着很大的差别。如在画面内容方面,电视讲究好看,色彩丰富,场景壮观;而安防监控则要求画面真实,关注的对象细致可察,并不讲究好看不好看。

(2) 新一代超高清主要还是为大屏幕电视或电视墙设计,因为在常规尺寸的电视上,肉眼无法分辨超高清电视技术带来的画面质量的改善。在安防监控领域,1 600万像素的IPC已经问世,可达到 $4\,872 \times 3\,248$ 的超高分辨率。因此,必须选用超高清大屏幕。显然,高清技术的发展将推动图像识别和智能分析技术的进一步发展和应用。

(3) 显示技术在历经黑白、彩色和数字高清显示时代后,将迎来大色域显示时代,因此颜色的真实再现是下一代显示的关键。而激光显示技术可使显示图像具有更大的色域表现空间,可以最真实地再现客观世界丰富、艳丽的色彩。同时完全继承数字高清时代的高分辨率、数字信号等特征,实现人类有史以来最完美的色彩还原。因此,条件许可,最好尽量选用。

(4) 未来的显示器也将彻底摆脱线缆的束缚,无线让时尚便携显示器成为可能。因此,在移动式安防监控系统与不便安装有线的环境中可尽量选用。

(5) 由于空手与手势操控显示器也绝对不是梦想,在条件许可情况下,可尽量选用。

参考文献

- [1] 雷玉堂. 光电信息技术. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [2] 雷玉堂. 光电信息实用技术. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [3] 雷玉堂. 光电检测技术 (第 2 版). 北京: 中国计量出版社, 2009.
- [4] 雷玉堂. 安全&光电. 深圳: 中国公共安全出版社, 2006.
- [5] 雷玉堂. 安防视频监控实用技术. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [6] 雷玉堂. 安防&智能化——视频监控系统智能化实现方案. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [7] 雷玉堂. 安防&物联网——物联网智能安防系统实现方案. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [8] 雷玉堂. 安防&云计算——物联网智能云安防系统实现方案. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [9] 牛温佳, 等. 移动网络视频监控系统. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [10] 刘文耀. 光电图像处理. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [11] 公安部科技信息化局. 安全防范技术实用手册. 深圳: 中国公共安全出版社, 2012.
- [12] 刘震, 等. 图像序列光流计算技术及其应用. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [13] 胡先志. 光器件及其应用. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [14] 陈振官, 等. 光电子电路及制作实例. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [15] 影响光纤传感器灵敏度的因素. 朗特威自动化商城. 2013.5.13.
- [16] 光纤传感器测量振动频率与光纤传感器测量转速. 朗特威自动化商城. 2013.5.21.
- [17] 王鹤宇. 光纤传感器在物联网关键技术中的应用. 电子技术, 2013 (1).
- [18] 激光显示技术概述. 中国电子网. 1970.1.1
- [19] 佚名. 解读 3D 与浸润式显示技术的应用及发展趋势. 互联网, 2014.12.5
- [20] 基于光场扫描的 360° 可探入悬浮三维显示系统. Optics express 杂志. 2013, 21 (9).
- [21] 李远东. 5 种“真”三维显示技术的发展现状及展望. 上海情报服务平台, 2014.8.25